

Министерство образования и науки Российской Федерации

**ВЕСТНИК  
ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО  
УНИВЕРСИТЕТА**

**Выпуск**                      **Серия: Строительство и архитектура**  
**43(62)**                      Научно-теоретический и производственно-практический журнал                      **2016**

Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta  
Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura  
(Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering  
Series: Civil Engineering and Architecture)

Выходит 4 раза в год  
Основан в 1999 г.

Волгоград

ВолгГАСУ

**С о д е р ж а н и е**

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ, ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ. МЕХАНИКА ГРУНТОВ

- Богомолов А. Н., Абрамов Г. А., Богомолова О. А., Цветкова Е. В.** Расчет устойчивости неза-  
крепленной круглой выработки, пройденной в грунтовом откосе 5
- Богомолов А. Н., Богомолова О. А., Донсков Р. А., Пристансков А. А., Кузнецова С. В.,  
Цветкова Е. В.** Устойчивость грунтового массива при подработке или ослаблении некоторой  
его области 14
- Богомолов А. Н., Олянский Ю. И., Щекочихина Е. В., Кузьменко И. Ю., Степанова Е. А., Чары-  
ков Д. А.** Экологические аспекты изменения геологической среды, учитываемые при проектиро-  
вании оснований и фундаментов на глинистых грунтах 25
- Бондарев А. Б., Бондарев Б. А., Борков П. В., Сапрыкин Р. Ю.** Исследование виброползучести  
полимерных композиционных материалов в конструкциях транспортных сооружений при цикли-  
ческих испытаниях 35
- Сычкина Е. Н., Пономарев А. Б.** Перспективы использования данных статического зондирования  
при проектировании свайных фундаментов на аргиллитоподобных глинах 44

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

- Голованова А. С., Акчурин Т. К., Пушкарская О. Ю.** Оценка эффективности многокомпонентной  
композиции на основе полимерных отходов в условиях воздействия агрессивных сред 57
- Иващенко Ю. Г., Павлова И. Л., Кочергина М. П.** Структурообразование силикатнатриевого свя-  
зующего, модифицированного водным раствором ацетата цинка 66
- Камкова С. В., Куликова И. А., Фомичев В. Т., Филимонова Н. А.** Экологическая оценка фунги-  
цидных свойств биоцида на основе бишофита для защиты бетонов от биоповреждений 77

<b>Козлов Ю. Д., Сидельникова О. П.</b> Перспективные технологии строительных материалов для строительной индустрии	86
<b>Перфилов В. А., Котляревская А. В., Канавец У. В.</b> Влияние полых стеклянных микросфер на свойства легких мелкозернистых бетонов	93
<b>Шошин Е. А., Иващенко Ю. Г.</b> Исследование процессов дегидратации модифицированных цементных гидросиликатов методом ИК-спектроскопии	104
<b>ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА</b>	
<b>Бурлаченко О. В., Буров А. М., Иванов М. В.</b> Исследование новых технологий и материалов для повышения работоспособности узлов строительных машин	112
<b>Бурлаченко О. В., Иванов М. В.</b> Метод повышения надежности трансмиссии строительных машин	121
<b>Фоменко Н. А., Богданов В. И., Бурлаченко О. В., Алексиков С. В.</b> Запорное устройство гидропривода строительного-дорожного машин	130
<b>ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ</b>	
<b>Куликова И. А., Фомичев В. Т., Филимонова Н. А.</b> Исследование процессов электрохимического окисления растворов бишофита в целях получения бактерицидных продуктов для процессов обеззараживания сточных вод	141
<b>Москвичева Е. В., Москвичева А. В., Геращенко А. А., Сахарова А. А., Геращенко М. А.</b> Электрохимический способ извлечения кубовых красителей из сточных вод красильно-печатных производств	152
<b>БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ И ОХРАНА ТРУДА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ</b>	
<b>Азаров В. Н., Кошкареев С. А.</b> Повышение экологической безопасности стройиндустрии совершенствованием систем обеспыливания с использованием комплексного дисперсионного анализа пылевых выбросов	161
<b>Богомолов А. Н., Жукова Н. С., Азаров Д. В., Хегай Д. С.</b> Оценка пылевого фактора в воздухе рабочей зоны на предприятиях по производству мела	175
<b>Михайловская Ю. С., Мензелинцева Н. В., Карапузова Н. Ю., Лактюшин В. А., Богомолов С. А.</b> Научно-методический подход к определению экологического ущерба от выбросов предприятий строительного комплекса	189
<b>Сидельникова О. П.</b> Проблемы управления профессиональными рисками	199
<b>ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА</b>	
<b>Беспалов В. И., Бурлаченко О. В., Гурова О. С., Парамонова О. Н., Лысова Е. П.</b> Математическое описание результирующих параметров процесса очистки токсичных компонентов отходящих и выхлопных газов объектов городской среды	211
<b>Михайловская Ю. С., Мензелинцева Н. В., Карапузова Н. Ю., Лактюшин В. А., Богомолов С. А.</b> Анализ содержания пыли в атмосферном воздухе мегаполиса	225
<b>Перфилов В. А., Шевцов И. В., Засличко Б. Я., Канавец У. В.</b> Утилизация отходов нефтегазодобывающих и теплогенерирующих производств для повышения промышленной и экологической безопасности	238
<b>ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ</b>	
<b>Алексиков С. В., Болдин А. И., Харланов В. Л.</b> Обоснование расчетной плотности парковки автомобилей на автомагистралях Волгограда	244
<b>Алексиков С. В., Болдин А. И., Санжапов Б. Х.</b> Проектирование автомобильных парковок на автомагистралях Волгограда	253
<b>Алексиков С. В., Болдин А. И., Пшеничкина В. А.</b> Стабилизация эксплуатируемого земляного полотна	261
<b>ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ</b>	
<b>Харитонова Л. П., Бурлаченко О. В.</b> Проблемы и некоторые методы повышения эффективности моделирования с помощью нейронлингвистического программирования в высшей математике, в том числе при решении экологических задач	270

## Content

### BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS. BASEMENTS, FOUNDATIONS. UNDERGROUND STRUCTURES. SOIL ENGINEERING

<b>Bogomolov A. N., Abramov G. A., Bogomolova O. A., Tsvetkova E. V.</b> Calculation of stability of unsupported round development in soil slope	5
<b>Bogomolov A. N., Bogomolova O. A., Donskov R. A., Pristanskov A. A., Kuznetsova S. V., Tsvetkova E. V.</b> Stability of soil massif at its underworking or weakening of some of its area	14
<b>Bogomolov A. N., Olyanskii Yu. I., Shchekochikhina E. V., Kuz'menko I. Yu., Stepanova E. A., Charykov D. A.</b> Ecological aspects of changes in geological environment taken into account at design of bases and foundations on clay ground	25
<b>Bondarev A. B., Bondarev B. A., Borkov P. V., Saprykin R. Yu.</b> Study of vibrocreep polymer composite materials in the design of transport constructions at cyclic tests	35
<b>Sychkina E. N., Ponomarev A. B.</b> Perspectives of using cone penetration test data at pile foundations designing on claystones	44

### BUILDING MATERIALS AND ARTICLES

<b>Golovanova A. S., Akchurin T. K., Pushkarskaya O. Yu.</b> Assessment of efficiency of multicomponent compositions based on polymer wastes under the influence of aggressive environment	57
<b>Ivashchenko Yu. G., Pavlova I. L., Kochergina M. P.</b> Structure formation of silicate-natric binder modified by zinc acetate water solution	66
<b>Kamkova S. V., Kulikova I. A., Fomichev V. T., Filimonova N. A.</b> Environmental assessment of fungicidal properties of biocide based on bishofite for concrete protection against biological damage	77
<b>Kozlov Yu. D., Sidel'nikova O. P.</b> Promising technologies of building materials for construction industry	86
<b>Perfilov V. A., Kotlyarevskaya A. V., Kanavets U. V.</b> The influence of hollow glass microspheres on the properties of light fine-grained concrete	93
<b>Shoshin E. A., Ivashchenko Yu. G.</b> Study of the dehydration process of modified cement hydrosilicates by the IR-spectroscopy	104

### TECHNOLOGY AND CONTROL IN CONSTRUCTION

<b>Burlachenko O. V., Burov A. M., Ivanov M. V.</b> Research of new technologies and materials for increased performance of units of construction equipment	112
<b>Burlachenko O. V., Ivanov M. V.</b> Method of increasing reliability of transmission of construction equipment	121
<b>Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V., Aleksikov S. V.</b> Locking device of hydraulic gear of construction and road cars	130

### WATER SUPPLY, SEWERAGE, CONSTRUCTIONS FOR WATER RESOURCES PROTECTION

<b>Kulikova I. A., Fomichev V. T., Filimonova N. A.</b> Study of the process of electrochemical oxidation of bishofite solution in order to get germicide product for the processes of disinfection of sewage	141
<b>Moskvicheva E. V., Moskvicheva A. V., Gerashchenko A. A., Sakharova A. A., Gerashchenko M. A.</b> Electrochemical method of vat dyes extraction from the wastewater of dyeing and printing facilities	152

### LIFE SAFETY AND LABOR SAFETY IN CONSTRUCTION

<b>Azarov V. N., Koshkarev S. A.</b> Increase of environmental safety of construction industry by improvement of decreasing dust systems using integrated analysis of variance dust emissions	161
<b>Bogomolov A. N., Zhukova N. S., Azarov D. V., Khegai D. S.</b> Assessment of dust factor in air of the working zone at the enterprises of chalk production	175
<b>Mikhailovskaya Yu. S., Menzelintseva N. V., Karapuzova N. Yu., Laktyushin V. A., Bogomolov S. A.</b> Scientific-methodological approach to the assessment of ecological damage from emissions of enterprises of the building complex	189
<b>Sidel'nikova O. P.</b> Problems of professional risks management	199

### ENVIRONMENTAL ISSUES IN URBAN PLANNING

<b>Bespalov V. I., Burlachenko O. V., Gurova O. S., Paramonova O. N., Lysova E. P.</b> Mathematical description of the resultant parameters of purification process of toxic components of stack and exhaust gases of objects of the urban environment	211
<b>Mikhailovskaya Yu. S., Menzelintseva N. V., Karapuzova N. Yu., Laktyushin V. A., Bogomolov S. A.</b> Analysis of dust content in the air of a large metropolis	225
<b>Perfilov V. A., Shevtsov I. V., Zaslachko B. Ya., Kanavets U. V.</b> Disposal of wastes of oil-extracting and heat producing productions for the increase of industrial and environmental safety	238

DESIGN, CONSTRUCTION AND MAINTENANCE OF HIGHWAYS, SUBWAYS, AERODROMES,  
BRIDGES AND TRAFFIC TUNNELS

- Aleksikov S. V., Boldin A. I., Kharlanov V. L.** Justification of the calculated density of car parks on highways in Volgograd 244
- Aleksikov S. V., Boldin A. I., Sanzhapov B. Kh.** Design of car parks on motorways in Volgograd 253
- Aleksikov S. V., Boldin A. I., Pshenichkina V. A.** Stabilization of operated roadbed 261

ORGANIZATION OF HIGHER EDUCATION IN FIELD OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE

- Kharitonova L. P., Burlachenko O. V.** Problems and some methods of increasing the efficiency of modelling using NLP in higher mathematics, including the solution of ecological tasks 270

УДК 624.137.2:624.131.53

**А. Н. Богомолов<sup>а, б</sup>, Г. А. Абрамов<sup>а</sup>, О. А. Богомолова<sup>а</sup>, Е. В. Цветкова<sup>а</sup>**

<sup>а</sup> *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

<sup>б</sup> *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

## **РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ НЕЗАКРЕПЛЕННОЙ КРУГЛОЙ ВЫРАБОТКИ, ПРОЙДЕННОЙ В ГРУНТОВОМ ОТКОСЕ**

Рассматривается устойчивость горизонтальной выработки круглого поперечного сечения, отработанной в однородном грунтовом массиве. Для условий, рассмотренных в работе, определены численные значения угла внутреннего трения грунта вмещающего массива, при которых контур выработки свободен от областей неупругих деформаций. Приведены графические зависимости и их математические аппроксимации, позволяющие определять контрольную величину угла внутреннего трения грунта вмещающего массива для любого сочетания переменных расчетных параметров.

**Ключевые слова:** грунтовый откос, круглая горизонтальная выработка, критерий устойчивости выработки, физико-механические свойства грунта, контрольное значение угла внутреннего трения.

Задача определения напряженного состояния грунтового массива, вмещающего выработку, и определение на ее контуре областей разрушения является актуальной для подземного и транспортного строительства, подземной разработки полезных ископаемых, захоронения техногенных отходов и т. д. Об этом свидетельствует большое количество научных публикаций, подборка иллюстраций из которых приведена ниже (рис. 1—5).

Оценить устойчивость подземной выработки можно на основе критерия устойчивости, который предложен в работах [6, 7]. Качественным признаком этого критерия является отсутствие зон неупругих деформаций на контуре выработки.

Если речь идет о связных грунтах, то в качестве количественного показателя могут быть выбраны либо удельное сцепление  $c$ , либо угол внутреннего трения  $\varphi$  грунта, либо величина приведенного давления связности  $\sigma_{св} = c(\gamma h \operatorname{tg} \varphi)^{-1}$ , являющейся, в определенном смысле, универсальной величиной.

Для отыскания областей неупругих деформаций (областей пластических деформаций, сдвига, дробления, разрыхления) можно использовать условие прочности Кулона, записываемое в виде

$$\sigma_1 - \sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_2 + 2\sigma_{св}) \sin \varphi$$

или

$$(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2 = (\sigma_x + \sigma_z + 2\sigma_{св})^2 \sin^2 \varphi \quad (1)$$

или

$$\operatorname{tg} \theta_{\max} = \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  — главные нормальные напряжения;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{xz}$  — компоненты напряжения в точке грунтового массива;  $h$  — характерный размер рассматриваемой области.

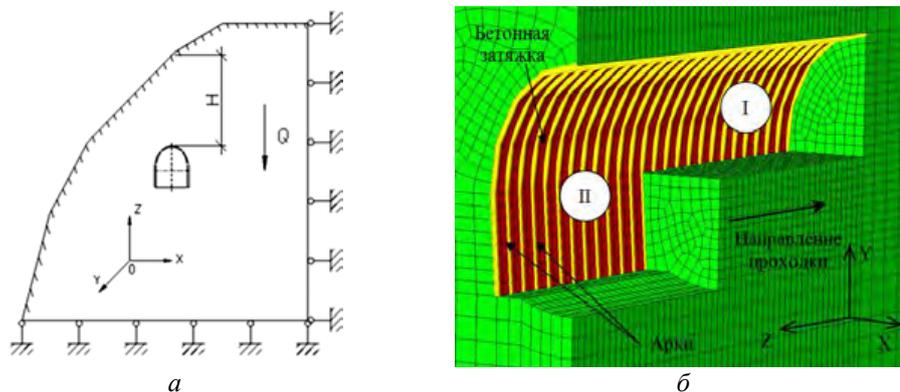


Рис. 1. Тоннель: *a* — принципиальная расчетная схема; *б* — схема основных этапов проходки и крепления тоннеля [1]

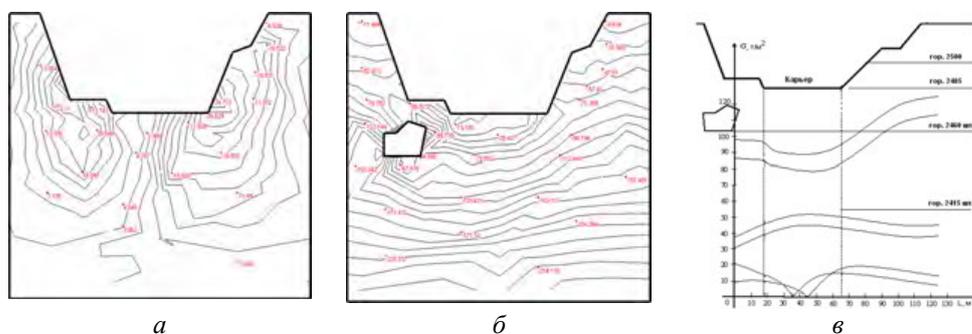


Рис. 2. Распределение напряжений в при бортовом массиве пород (после образования камеры): *a* — вертикальные  $\sigma_z$ ; *б* — горизонтальные  $\sigma_x$ ; *в* — касательные  $\tau_{xz}$  [2]

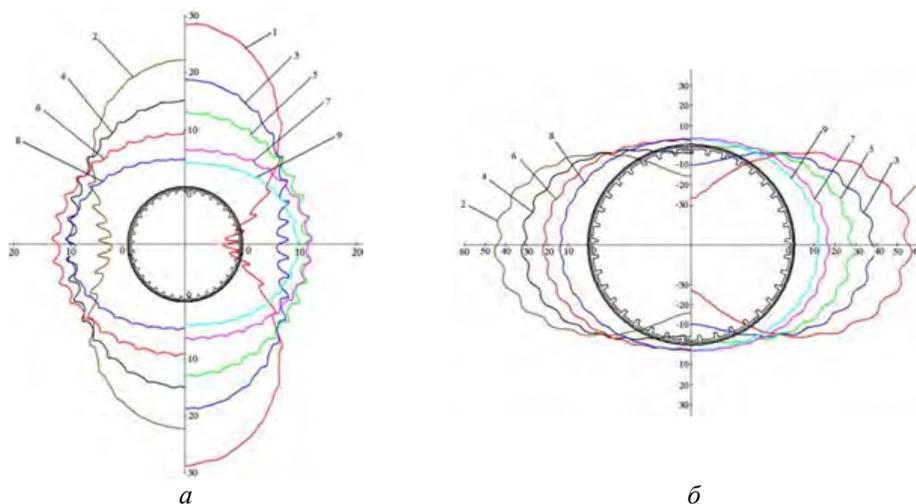


Рис. 3. Характер распределения тангенциальных напряжений по центральной оси кольцевого ребра: *a* — на внешнем контуре обделки; *б* — на внутреннем контуре обделки при модуле деформации вмещающего массива, МПа: 1 — 50; 2 — 75; 3 — 100; 4 — 150; 5 — 200; 6 — 400; 7 — 800; 8 — 1300; 9 — 1600 [3]

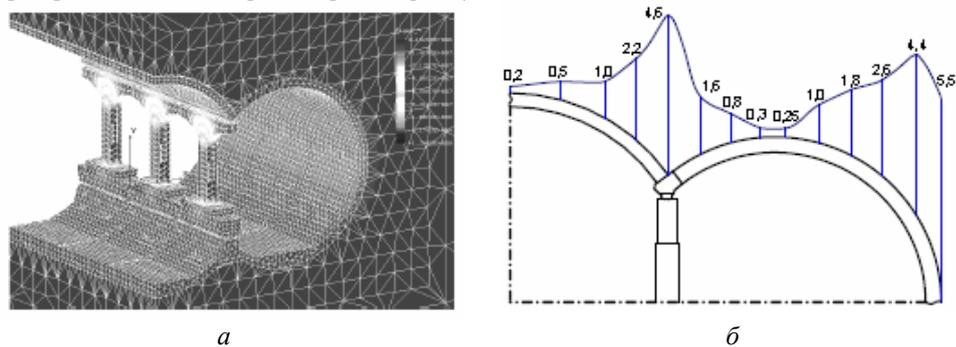


Рис. 4. Картина распределения вертикальных напряжений  $\sigma_y$ : *a* — при сооружении колонной станции на полное сечение, Па; *б* — эюра распределения вертикальных нагрузок на обделку со стальным колонно-прогонным комплексом (поперечной разрез по колонне), МПа [3]

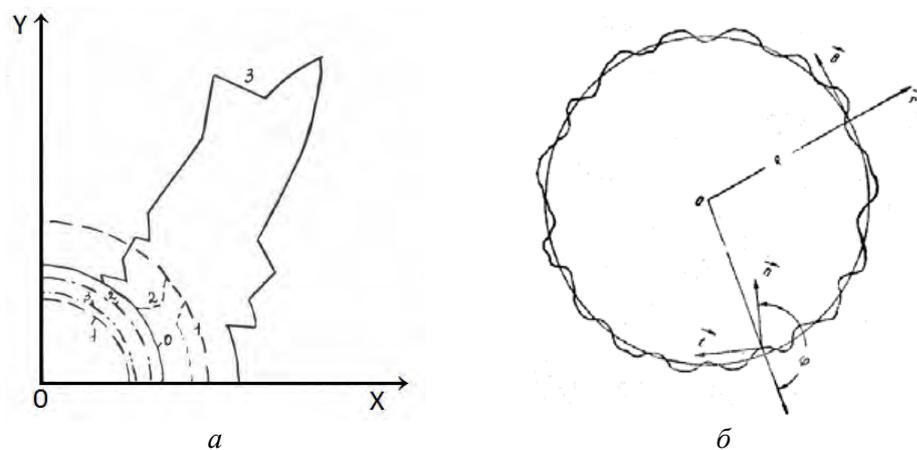


Рис. 5. Контуры пластических зон и зон смещений: *a* — на поверхности незакрепленной выработки; *б* — характерный профиль шероховатой выработки и расчетная схема [4, 5]

Если вмещающий массив представлен скальными грунтами, то зная значения их пределов прочности при растяжении  $R_p$  и сжатии  $R_{сж}$ , можно вычислить величины, эквивалентные прочностным свойствам связного глинистого грунта по известным формулам проф. В. В. Соколовского [8, 9]:

$$c^{эКВ} = 0,5(R_p R_{сж})^{0,5};$$

$$\varphi^{эКВ} = \arcsin \left( \frac{R_{сж} - R_p}{R_p + R_{сж}} \right).$$

Численные значения этих показателей для наиболее распространенных скальных грунтов представлены в таблице, составленной на основании данных, приведенных в работах [10, 11]. Анализ приведенных данных показал, что минимальное значение эквивалентного угла внутреннего трения  $\varphi_{\min}^{эКВ} = 36^\circ$ , а эквивалентного удельного сцепления  $c_{\min}^{эКВ} = 6,2$  МПа. Макси-

мальные значения этих показателей соответственно равны  $\varphi_{\max}^{\text{экв}} = 69^\circ$  и  $c_{\max}^{\text{экв}} = 77,5$  МПа. Таким образом, в случае скального грунта можно также использовать условие прочности (1).

В настоящей работе выполнен анализ устойчивости подземной выработки круглого сечения, расположенной в грунтовом откосе. Задача ведена к определению методом подбора такого значения угла внутреннего трения грунта, при котором контур выработки свободен от областей неупругих деформаций (рис. 6, 7, 8).

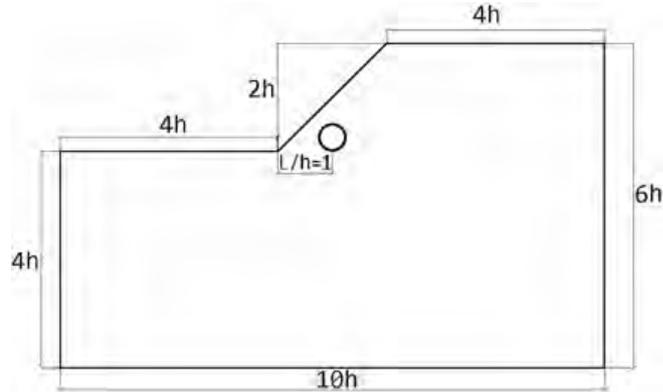


Рис. 6. Геометрические размеры механико-математической модели

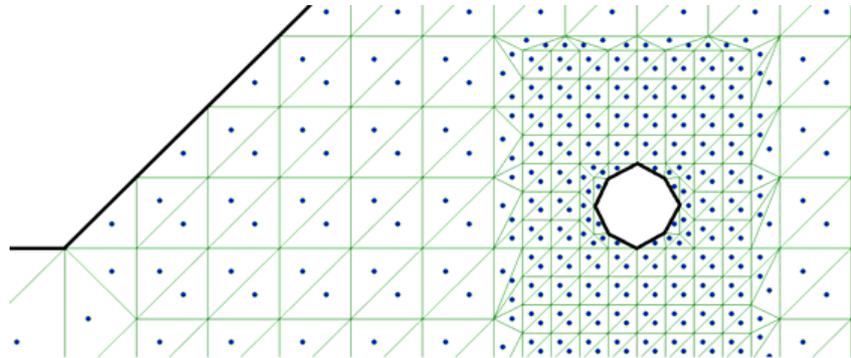


Рис. 7. Фрагмент расчетной схемы МКЭ

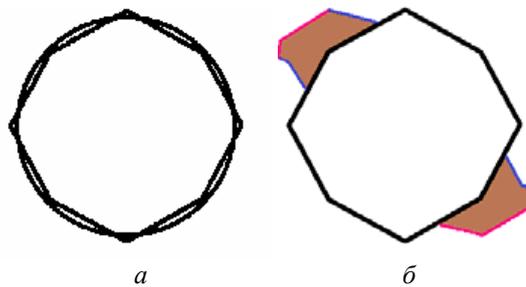


Рис. 8. Имитация отверстия правильным многоугольником: *a* — круглого отверстия; *б* — области неупругих деформаций на контуре выработки

При выполнении численного исследования использована компьютерная программа «Устойчивость. Напряженное состояние» [12], разработанная в ВолгГАСУ, в которой для определения напряжений формализован в том числе и метод конечных элементов (МКЭ).

*Физико-механические свойства скальных грунтов*

Вид скального грунта	$\gamma$ , т/м <sup>3</sup>	$E$ , 10 <sup>3</sup> МПа	$R_{сж}$ , МПа	$R_p$ , МПа	$\varphi^{экр}$ , град.	$C^{экр}$ , МПа	$\xi_0(\mu)$
Алевролит	2,30	19	26	1,5	63	6,2	0,35
Андезит	2,40	57	97	5	64	22,0	0,21
Аргиллит	2,50	27	34	2,5	59	9,2	0,27
Габбро	2,90	96	255	13	64	57,6	0,13
Гнейс	2,90	72	87	13,5	47	34,3	0,12
Гранит	2,60	56	230	11,5	65	51,4	0,10
Диабаз	3,00	70	343	17,5	64	77,5	0,08
Доломит	2,55	74	81	8	55	25,5	0,12
Известняк кремнистый	2,20	38	190	6,5	69	14,0	0,37
Известняк хемогенный	2,60	62	50	3	62	12,2	0,26
Песчаник	2,60	43	65	4	62	16,1	0,28
Сланец глинистый	3,05	40	47	7,5	46	18,8	0,38
Сланец песчанистый	3,10	40	51	13	36	25,7	0,36

Размеры расчетной области приведены на рис. 6. Вмещающий массив представляет собой прямолинейный однородный откос с углами  $\beta = 25^\circ; 45^\circ; 60^\circ$ , ослабленный круглой выработкой диаметром  $d = 0,05h; 0,15h; 0,2h; 0,25h; 0,3h$ , где  $H/2h = 1$  ( $H$  — реальная высота откоса), находящейся на расстоянии  $h = H/2$  от точки перехода откоса в его подошву.

Количество элементов в расчетных схемах изменялось от 1031 до 1225, а количество узлов сопряжения от 557 до 653 в зависимости от величины угла  $\beta$ .

В результате выполненных вычислений построены графические зависимости контрольной величины угла внутреннего трения от величины приведенного давления связности  $\varphi = f(\sigma_{св})$ , которые приведены на рис. 9. Установлено, что все полученные кривые могут быть аппроксимированы выражением

$$\varphi = a\sigma_{св}^b, \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  — действительные коэффициенты, причем, коэффициент  $a$  имеет размерность (град), а коэффициент  $b$  — безразмерная величина.

На рис. 10 приведены графики для определения численных значений коэффициентов  $a$  и  $b$ , входящих в выражение (2). Здесь следует отметить, что численные значения коэффициентов  $b$  для различных отношений  $d/h$ , соответствующие одинаковым значениям угла  $\beta$ , практически равны между собой (разница составляет не более 3,6 %), т. е. не зависят от  $d/h$  (где  $d$  — диаметр выработки). Поэтому на рис. 10,  $b$  изображена одна кривая.

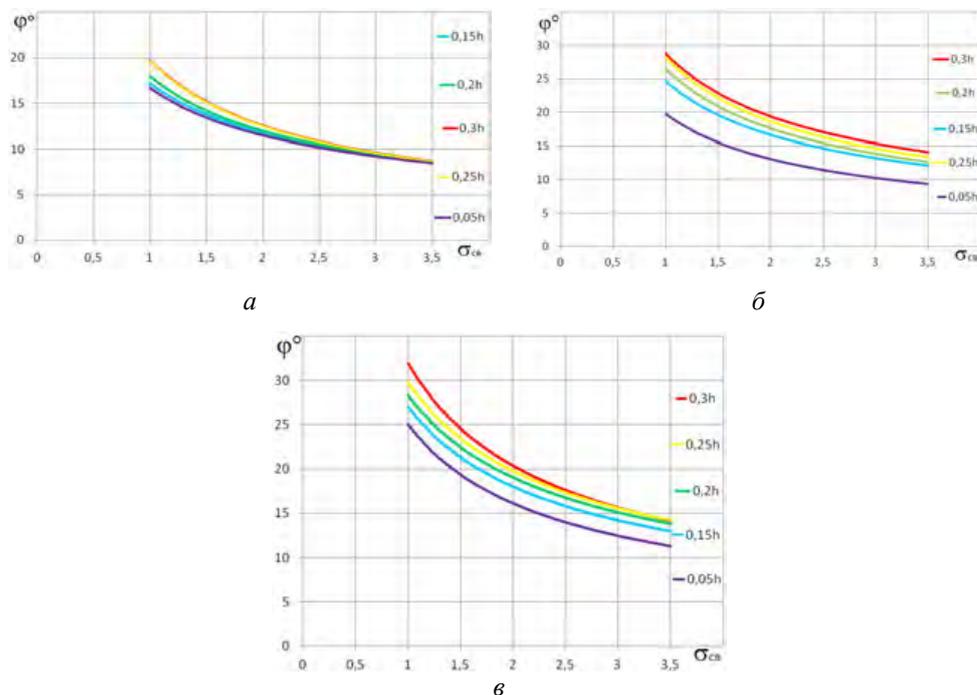


Рис. 9. Графические зависимости контрольной величины угла внутреннего трения от величины приведенного давления связности  $\varphi = f(\sigma_{св})$ : *a* — при  $\beta = 25^\circ$ ; *б* —  $\beta = 45^\circ$ ; *в* —  $\beta = 60^\circ$

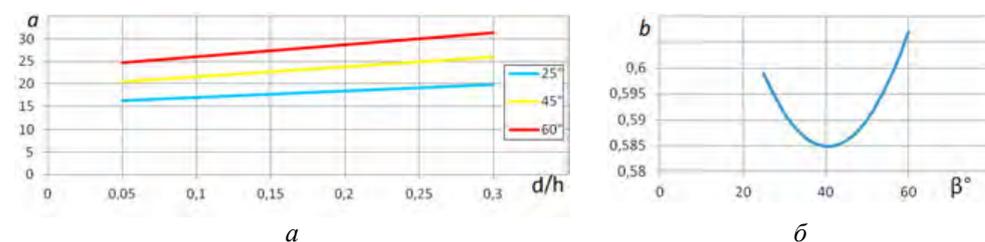


Рис. 10. Графики для определения коэффициентов: *a* — коэффициента *a*; *б* — коэффициента *b*

#### Вывод:

1. Результаты анализа процесса зарождения областей неупругих (пластических) деформаций на контуре горизонтальной подземной выработки круглого сечения, отработанной в однородном откосе, говорят о том, что при увеличении угла заложения откоса  $\beta$  и диаметра выработки происходит активизация этого процесса, а увеличение прочностных свойств грунта ( $c$ ,  $\varphi$ ,  $\sigma_{св}$ ), напротив, его затормаживает.

2. В результате вычислений построены графические зависимости вида  $\varphi = f(\sigma_{св})$ , при помощи которых можно определить такие значения угла внутреннего трения грунта (контрольные значения), при которых при всех прочих равных условиях контур выработки свободен от неупругих деформаций.

3. Использование графических зависимостей вида  $\varphi = f(\sigma_{св})$  и метода линейной интерполяции позволяет определить контрольное значение угла внутреннего трения для любых сочетаний численных значений переменных расчетных параметров при условии, что последние находятся внутри интервалов изменения, рассмотренных в работе. При помощи сопоставительных расчетов установлено, что результаты, получаемые таким образом, отличаются от результатов вычислений непосредственно при помощи компьютерной программы [12] не более чем на 6,7 %. Это позволяет рекомендовать полученные графические зависимости для предварительной оценки устойчивости горизонтальных круглых выработок, отработанных в однородных откосах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Протосеня А. Г., Беляков Н. А. Определение пространственного напряженно-деформированного состояния временной крепи железнодорожного тоннеля с учетом влияния рельефа земной поверхности // Известия ТулГУ. Науки о земле. 2011. Вып. 1. С. 158—166.
2. Абдылдаев Э. К., Салимова Г. Е. Напряженно-деформированное состояние прибортового массива в условиях подработки камерами // Вестник КРСУ. Науки о земле. 2008. Том 8. № 3. С. 157—159.
3. Potemkin D., Demenkov P., Karasev M. Формирование напряженно-деформированного состояния объектов городского хозяйства при интенсивной застройке и освоении подземного пространства // Górnictwo i Geologia, Krakow. 2010. Том 5. Zeszyt 2. S. 159—167.
4. Тултуков Б. Т. Расчет напряженно-деформированного состояния породного массива вокруг незакрепленной горизонтальной выработки // Вестник Исыккульского государственного университета им. К. Тыныстанова. 2006. № 16.
5. Шейнин В. И. Распределение напряжений в окрестности горной выработки с учетом неровности контура // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1965. № 4. С. 21—23.
6. Новый критерий оценки длительной устойчивости однородных откосов на основе анализа напряженно-деформированного состояния / А. Н. Богомолов, М. Ю. Нестратов, А. В. Соловьев, С. И. Шиян // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Стр.-во и архит. 2009. Вып. 14(33). С. 5—12.
7. Определение предельной глубины заложения горизонтальных выработок различного поперечного сечения / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, М. А. Шубин, Д. В. Павлов, М. О. Подлинев, А. В. Соловьев // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая, 2013. Вып. 2 (27). Ст. 18. Режим доступа: [www.vestnik.vgasu.ru](http://www.vestnik.vgasu.ru)
8. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Физ.-мат. лит., 1960. 121 с.
9. Соколовский В. В. Теория пластичности. М.: Высшая школа, 1969. С. 349—357.
10. Богатилов В. Н. Магматические горные породы. Т. 3. М.: Наука, 1985. 488 с.
11. Капитонов А. М., Васильев В. Г. Физические свойства горных пород западной части Сибирской платформы. Красноярск: СФУ, 2011. 423 с.
12. Устойчивость (напряженно-деформированное состояние): свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: пат. Рос. Федерации № 2009613499 / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, М. Ю. Нестратов, Н. Н. Нестратов, Н. Н. Потапова, М. М. Степанов, А. Н. Ушаков; опубл. 18.12.2009, Бюл. № 23; заявл. 19.05.2009; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 30.06.2009. 1 с.

© Богомолов А. Н., Абрамов Г. А., Богомолова О. А., Цветкова Е. В., 2016

Поступила в редакцию  
в феврале 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Расчет устойчивости незакрепленной круглой выработки, пройденной в грунтовом откосе / А. Н. Богомолов, Г. А. Абрамов, О. А. Богомолова, Е. В. Цветкова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 5—13.

*Об авторах:*

**Богомолов Александр Николаевич** — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой гидротехнических и земляных сооружений, проректор по научной работе, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; проф. кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, [banzaritsyn@mail.ru](mailto:banzaritsyn@mail.ru)

**Абрамов Генрих Артурович** — аспирант кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [z\\_genrih@mail.ru](mailto:z_genrih@mail.ru)

**Богомолова Оксана Александровна** — канд. техн. наук, доц. кафедры математики и информационных технологий, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [banzaritsyn@mail.ru](mailto:banzaritsyn@mail.ru)

**Цветкова Елена Владимировна** — канд. техн. наук, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [Elentsvetkova@yandex.ru](mailto:Elentsvetkova@yandex.ru)

**A. N. Bogomolov, G. A. Abramov, O. A. Bogomolova, E. V. Tsvetkova**

### **CALCULATION OF STABILITY OF UNSUPPORTED ROUND DEVELOPMENT IN SOIL SLOPE**

The authors consider the stability of a horizontal development of round cross section that was used in uniform soil massif. The numerical values of an internal friction angle of soil of the containing massif at which the contour of the development is free from areas of inelastic deformations were defined for the conditions considered in the paper. Graphic dependences and their mathematical approximations allowing to determine the check value of an internal friction angle of soil of the containing massif for any combination of variable calculated parameters are provided.

**Key words:** soil slope, round horizontal development, criterion for stability of development, physical and mechanical properties of soil, check value of an internal friction angle.

#### **REFERENCES**

1. Protosenya A. G., Belyakov N. A. [Rediction of railroad tunnel's temporary support stress-strain condition with taking into account of earth surface local topography]. *Izvestiya TulGU. Nauki o zemle* [Proceedings of the TSU. Earth sciences], iss. 1, pp. 158—166.
2. Abdylbaev E. K., Salimova G. E. [Stress strain state of near edge zone mass under conditions of underworking of stalls]. *Vestnik KRSU. Nauki o zemle* [News of Kyrgyz-Russian Slavic University. Earth sciences], 2008, 8(3), pp. 157—159.
3. Potemkin D., Demenkov P., Karasev M. [Formation of stress strain state of the objects of municipal facilities at intensive building and development of the underground space]. *Górnictwo i Geologia*, Krakow, 2010, Tom 5, Zeszyt 2. S. 159—167. (In Russ.).
4. Tultukov B. T. [Calculation of stress strain state of rock mass around an untimbered horizontal drift]. *Vestnik Isykkul'skogo gosudarstvennogo universiteta im. K. Tynystanova* [News of Iisykkul'sk State University named after K. Tynystanov], 2006, no. 16.
5. Sheinin V. I. The distribution of stresses in the vicinity of mine workings with consideration of irregularities in outline. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1965, 2(4), pp. 235—238.
6. Bogomolov A. N., Nestratov M. Yu., Solov'iev A. V., Shiyan S. I. [The new criterion of evaluation of protracted stability of homogeneous slopes based on the analysis of tense deformed condition]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2009, iss. 14(33), pp. 5—12.
7. Bogomolov A. N., Bogomolova O. A., Shubin M. A., Pavlov D. V., Podlinev M. O., Solov'ev A. V. [Determination of the limit depth of horizontal working deposits of various cross sections]. *Internet-Vestnik VolgGASU*, 2013, no. 2(27), paper 18. Available at: [www.vestnik.vgasu.ru](http://www.vestnik.vgasu.ru)

8. Sokolovskii V. V. *Statika sypuchei sredy* [Statics of loose medium]. 3d ed. Moscow, Fiziko-Matematicheskaya Literatura Publ., 1960. 121 p.
9. Sokolovskii V. V. *Teoriya plastichnosti* [Theory of plasticity]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1969, pp. 349—357.
10. Bogatkov V. N. *Magmaticheskie gornye porody* [Magmatic rocks]. Vol. 3. Moscow, Nauka Publ., 1985, 488 p.
11. Kapitonov A. M., Vasil'ev V. G. *Fizicheskie svoistva gornykh porod zapadnoi chasti Sibirskoi platformy* [Physical properties of rocks of the western part of Siberian platform]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2011. 423 p.
12. Bogomolov A. N., Bogomolova O. A., Nestratov M. Yu., Nestratov N. N., Potapova N. N., Stepanov M. M., Ushakov A. N. *Ustoichivost' (napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie)* [Stability (stress-strain state)]. Patent RF, no. 2009613499, 2009.

*For citation:*

Bogomolov A. N., Abramov G. A., Bogomolova O. A., Tsvetkova E. V. [Calculation of stability of unsupported round development in soil slope]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 5—13.

*About authors:*

**Bogomolov Aleksandr Nikolaevich** — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Vice-Rector for Scientific Research, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation; Professor of Construction Operations and Geotechnics Department, Perm National Research Polytechnic University. 29, Komsomolskii Prospect, Perm', 614990, Russian Federation, [banzaritcyn@mail.ru](mailto:banzaritcyn@mail.ru)

**Abramov Genrikh Arturovich** — Postgraduate student Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [z\\_genrih@mail.ru](mailto:z_genrih@mail.ru)

**Bogomolova Oksana Aleksandrovna** — Candidate of Engineering Science, Docent of Mathematics and Information Technology Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [banzaritcyn@mail.ru](mailto:banzaritcyn@mail.ru)

**Tsvetkova Elena Vladimirovna** — Candidate of Engineering Science, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [Elentsvetkova@yandex.ru](mailto:Elentsvetkova@yandex.ru)

УДК 624.131

**А. Н. Богомолов<sup>а, б</sup>, О. А. Богомолова<sup>а</sup>, Р. А. Донсков<sup>а</sup>, А. А. Пристансков<sup>а</sup>,  
С. В. Кузнецова<sup>а</sup>, Е. В. Цветкова<sup>а</sup>**

<sup>а</sup> *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

<sup>б</sup> *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

### **УСТОЙЧИВОСТЬ ГРУНТОВОГО МАССИВА ПРИ ПОДРАБОТКЕ ИЛИ ОСЛАБЛЕНИИ НЕКОТОРОЙ ЕГО ОБЛАСТИ**

Рассматриваются два приема генерации сетки конечных элементов в случае, когда внутри исследуемой области существуют природные или техногенные полости или ослабленные зоны различной конфигурации. Приведены примеры расчета напряженного состояния и построения областей пластических деформаций в подработанном основании заглубленного ленточного фундамента и откосе, ослабленном круглой подземной выработкой и просадочной областью. Приведены картины изолиний напряжений, перемещений и предельных областей.

**Ключевые слова:** генерация сетки конечных элементов, напряженное состояние подработанного основания, ослабленный грунтовый откос, снижение физико-механических свойств грунта, перераспределение напряжений, потеря устойчивости.

При решении задач геомеханики нередко встречаются случаи, когда в силу природных, техногенных, антропогенных и других причин в некоторых областях грунтовых массивов происходит ухудшение физико-механических свойств грунтов. Примером может служить изменение свойств грунтов при замачивании или подработке грунтового массива, когда в некоторой его области прочностные и деформационные свойства просто обнуляются.

В этом случае приходится рассматривать напряженное состояние неоднородного грунтового массива, что возможно, например, при использовании метода конечных элементов (МКЭ).

В этом случае обычно генерируется сплошная конечно-элементная сетка, одна или две вершины треугольных элементов, оказавшихся внутри полости, привязываются к ее границе, а физико-механическим свойствам элементов, расположенным внутри ослабленной зоны или полости, присваиваются значения, резко отличающиеся от значений физико-механических свойств вмещающего массива, либо очень близкие к нулю по величине.

Такой подход, однако, сопряжен с существенной потерей точности вычислений. Как отмечает профессор А. Б. Фадеев, «практика показывает, что если разница модулей (упругости) элементов сети составляет четыре порядка и выше, то ошибки округления при одинарной точности искажают решение до неузнаваемости» [1].

В настоящее время известно несколько путей решения этой проблемы, которые, описаны в [2].

Нами предложены приемы генерации конечно-элементной сетки при условии, что внутри полости конечные элементы отсутствуют: генерация конечно-элементной сетки может быть осуществлена без удаления и с удалением вершин элементов (узловых точек) (рис. 1).

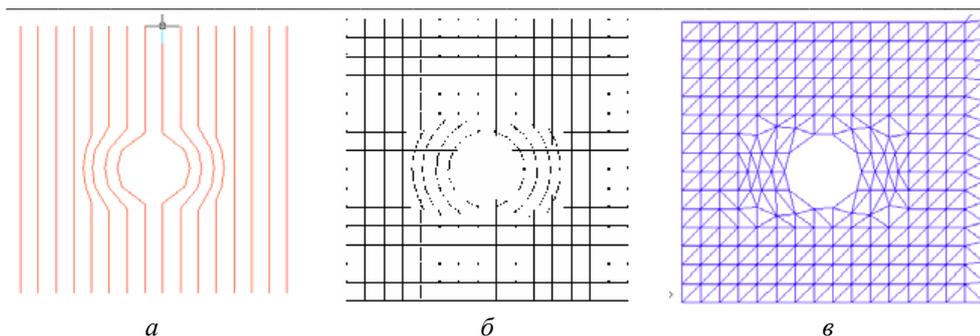


Рис. 1. Генерация конечно-элементной схемы без удаления узловых точек

*Первый прием* заключается в том, что сначала в среде AutoCAD делается разметка (см. рис. 1, а), а затем по этой разметке строятся вертикальные, как в рассматриваемом примере, или горизонтальные полилинии (poliline), с одинаковым числом вершин (см. рис. 1, б). Эти вершины в дальнейшем будут вершинами элементов сети. Из рис. 1, б видно, что две соседние полилинии образуют границу полости: они как бы раздвинуты в горизонтальном направлении. Вершины полилиний точно принадлежат этим границам. Отметим, что разбиение исследуемой области полилиниями, должно проводиться в таком направлении, чтобы число узлов полилинии было меньше числа самих полилиний, т. е. исходя из условия минимизации ширины матрицы жесткости системы (МЖС).

Очевидно, что такая методика удобна в том случае, если две полилинии недалеко отстоят друг от друга, а граница полости имеет плавные очертания. Например, когда полость имеет форму небольшого круга, эллипса, щели, ориентированной вдоль полилинии, и т. д.

В противном случае целесообразно использовать *второй прием*, отличающийся от первого тем, что используется методика генерации конечно-элементной сетки с удалением вершин конечных элементов, расположенных внутри границ полости (рис. 2).

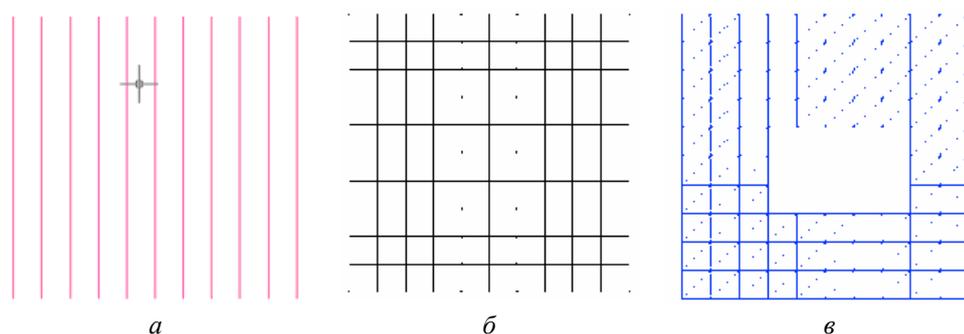


Рис. 2. Генерация конечно-элементной схемы при удалении узловых точек

При таком подходе разметка сетки конечных элементов не предусматривает существенного искривления полилиний и к границам полости привязываются узлы ближайших к ним полилиний.

На рис. 2, а показана разметка, а на рис. 2, б — полилинии с узлами, определяемыми этой разметкой.

Процедура привязывания проведена пять раз (удалены пять вертикальных рядов элементов). В результате этой процедуры построена конечно-элементная сетка, которая содержит прямоугольную полость (см. рис. 2, в).

Оба этих приема реализованы в компьютерной программе [3]. Чтобы система уравнений матрицы жесткости оставалась совместной, программа предусматривает обнуление вертикальных и горизонтальных перемещений восьми узлов, в которых сопряжены эти вершины. Проведение этой процедуры равносильно удалению из матрицы жесткости системы соответствующих уравнений.

Использование компьютерной программы [3] позволяет создавать конечно-элементные сетки с полостями, имеющими любые заранее заданные размеры, а также границы произвольной формы.

Известно, что в рамках гипотез линейной теории упругости численные значения напряжений, вычисляемых в точках исследуемой области, зависят от величины и направления суммарного вектора внешних нагрузок  $R$ , объемного веса  $\gamma$  и коэффициента бокового давления  $\xi_0$ , который связан с величиной коэффициента Пуассона  $\mu$  известным соотношением.

Если исследуемая область неоднородна, то численные значения напряжений будут уже зависеть от величин отношений модулей упругости  $E$  (или модулей общей деформации  $E_0$ ) и коэффициентов бокового давления  $\xi_0$  контактирующих неоднородностей.

Такая ситуация возникает, например, тогда, когда расчетной схемой предусмотрено, что нагрузка передается на грунтовое основание через толстый жесткий штамп, имитирующий фундамент, если основание неоднородно или в нем имеются какие-либо полости (пустоты).

В этом случае, при всех прочих равных условиях, картины полей компонент полного напряжения будут существенно отличаться от соответствующих картин, построенных при тех же граничных условиях, но в однородной области. Это обусловит то, что положение и форма наиболее вероятной поверхности выпора (НВПВ), величина коэффициента запаса устойчивости основания  $K$ , размеры и форма областей пластических деформаций, которые возникнут в неоднородном основании после превышения интенсивностью нагрузки первого критического значения, будут тоже другими.

Известно, что толстый жесткий фундамент оказывает существенное влияние на распределение напряжений в активной зоне [4, 5].

Рассмотрим примеры.

**Ослабленное основание.** Построим изолинии напряжений и области пластических деформаций в активной зоне заглубленного ленточного фундамента при отсутствии и наличии квадратной полости при условии, что основание фундамента сложено однородным глинистым грунтом со следующими физико-механическими характеристиками:  $\gamma^r = 2 \text{ кН/м}^3$ ;  $\phi^r = 18,5^\circ$ ;  $C^r = 0,045 \text{ МПа}$ ,  $E^r = 40 \text{ МПа}$  и  $\xi_0 = 0,75$  ( $C$  и  $\phi$  — удельное сцепление и угол внутреннего трения);  $E^0 = 15\,795 \text{ МПа}$ ,  $\xi_0 = 0,17$ ,  $\gamma^0 = 3 \text{ кН/м}^3$ , толщина фундамента  $d = 0,1h_3$ , а глубина заложения фундамента равна его ширине  $h_3 = 2b = 2 \text{ м}$ . Интенсивность равномерно распределенной нагрузки при рас-

чете принята постоянной  $q = 7\gamma h_3$ . Все вычисления выполнены при помощи компьютерной программы [6], в которой для отыскания напряжений реализован в том числе и метод конечных элементов. Расчетная схема состоит из 7360 одинаковых треугольных элементов, сопряженных в 3827 узлах, ширина матрицы жесткости системы равна 86.

На рис. 3—5 приведены картины изолиний безразмерных (в долях  $\gamma h_3$ ) компонент  $\sigma_z$ ;  $\sigma_x$ ;  $\tau_{zx}$  напряжения в основании заглубленного фундамента при наличии и отсутствии ослабления. Здесь же приведены очертания областей пластических деформаций, построенных из условия прочности Кулона и по методике, изложенной в работе [7].

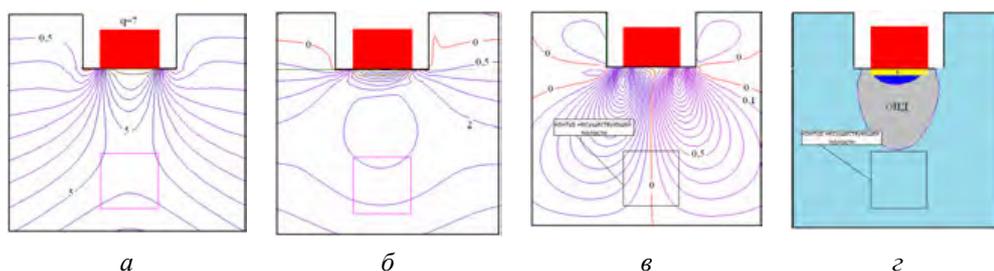


Рис. 3. Изолинии компонент напряжения  $\sigma_z(a)$ ;  $\sigma_x(b)$ ;  $\tau_{zx}(v)$  и область пластических деформаций ( $z$ ) в однородном основании заглубленного фундамента при отсутствии полости

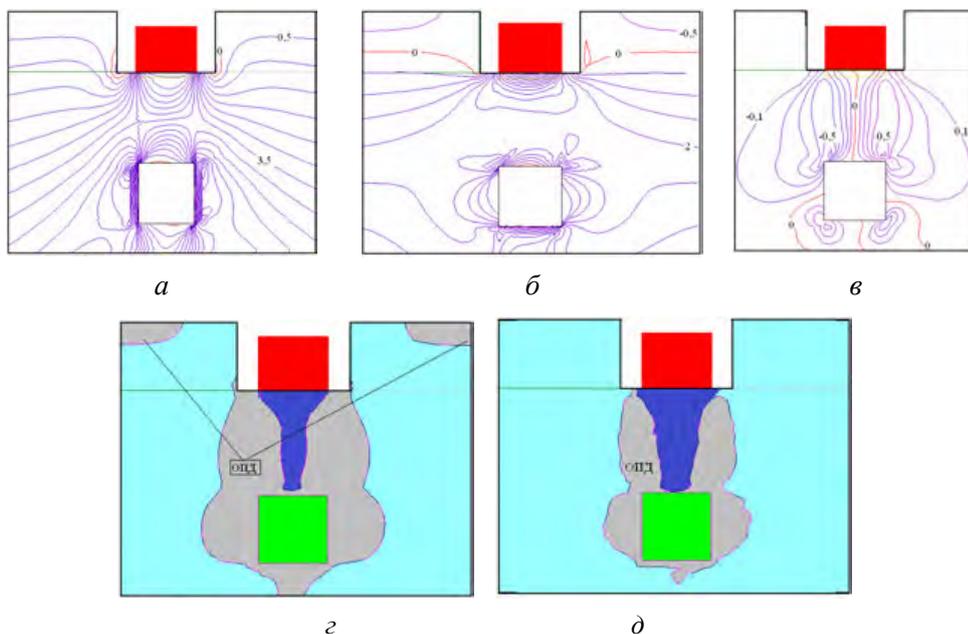


Рис. 4. Изолинии компонент полного напряжения  $\sigma_z(a)$ ;  $\sigma_x(b)$ ;  $\tau_{zx}(v)$  и области пластических деформаций ( $z, д$ ) в основании, ослабленном полостью при условии передачи нагрузки непосредственно на грунт

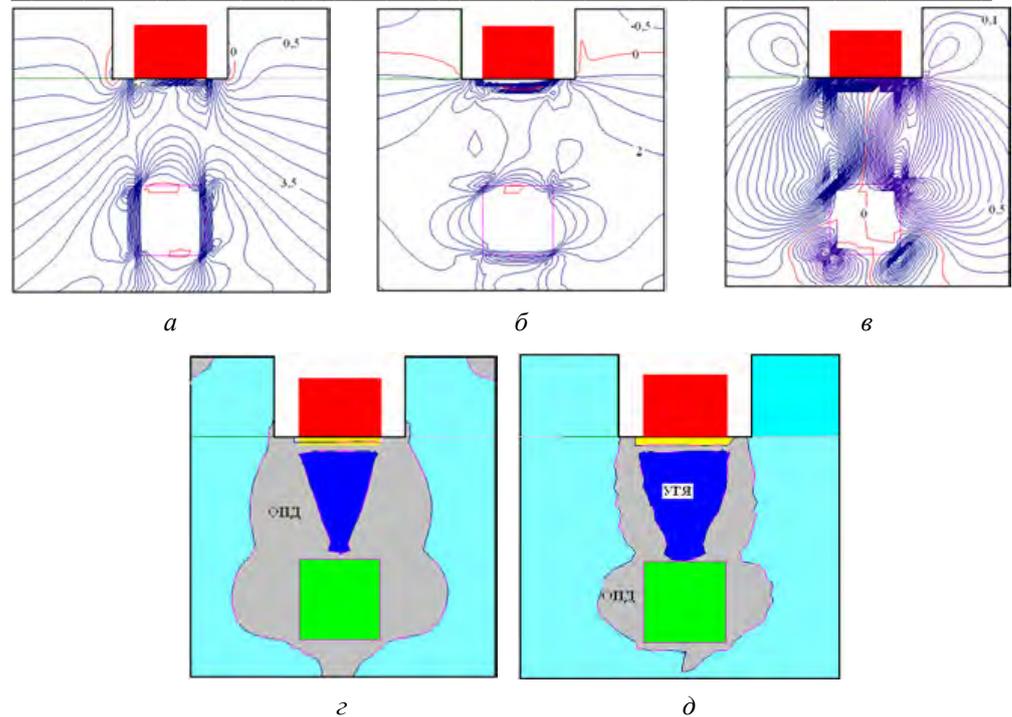


Рис. 5. Изолинии компонент полного напряжения  $\sigma_z$  (а);  $\sigma_x$  (б);  $\tau_{zx}$  (в) и области пластических деформаций (г, д) в основании, ослабленном полостью при условии передачи нагрузки через бетонный фундамент

Разница между этими рисунками заключается в том, что на рис. 3 приведены картины изолиний для однородного основания при условии, что нагрузка передается непосредственно на основание и нет ослабления (полости); на рис. 4 и 5 изображения соответствуют условию, когда нагрузка передается на основание, ослабленное квадратной полостью, непосредственно на грунт и через фундаментную плиту.

Даже визуальный анализ рисунков показывает, что наличие фундаментной плиты и полости существенным образом трансформируют напряженное состояние грунтового основания. Легко видеть, что при всех прочих равных условиях наличие штампа и ослабления увеличивают размеры областей пластических деформаций. Этот результат может показаться странным, так как известно, что наличие жесткого фундамента замедляет процесс развития ОПД, но очевидно, что в рассмотренном случае доминирующим фактором, обуславливающим размеры этих областей, является размер полости.

Для подтверждения данного предположения проведены вычисления и выполнены построения в среде компьютерной программы [6] областей пластических деформаций при условии, что линейные размеры квадратной полости уменьшены в два и четыре раза, а все остальные расчетные величины остались прежними.

Графическая интерпретация результатов этих вычислений приведена на рис. 6, из которого ясно видно, что при уменьшении геометрических размеров ослабляющей полости происходит резкое уменьшение размеров пласти-

ческих областей. А если при построении ОПД используется прием, изложенный в работе [7], то размеры пластических областей получаются заметно меньше, чем при использовании условия прочности Кулона.

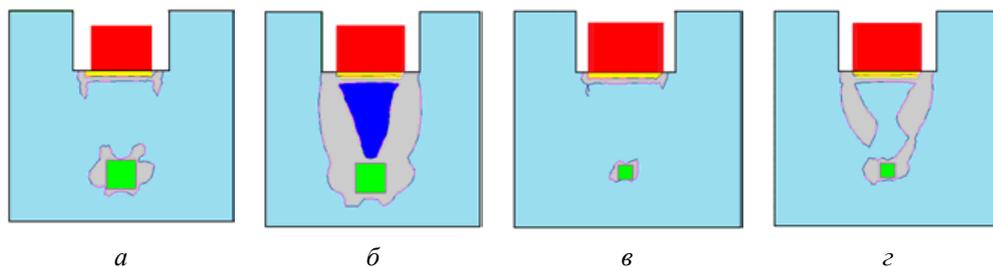


Рис. 6. Области пластических деформаций при передаче нагрузки через фундамент, построенные, исходя из рекомендаций работы [7] и условия прочности Кулона соответственно, и при условии, что геометрические размеры квадратной полости уменьшены в два (а, б) и четыре (в, з) раза

**Нагруженный откос.** В инженерной практике часто бывает, когда в силу природных, техногенных или антропогенных причин в областях однородных грунтовых массивов происходит резкое изменение прочностных и деформационных свойств грунтов, которые практически всегда ухудшаются. Примером может служить изменение свойств структурно неустойчивых грунтов при замачивании.

Рассмотрим однородный откос с высотой  $H = 35$  м и углом  $\beta = 49^\circ$ , сложенный однородным лессовым суглинком, имеющим следующие характеристики: плотность  $\gamma = 2$  кН/м<sup>3</sup>;  $\varphi = 20^\circ$ ;  $C = 0,068$  МПа; модуль общей деформации  $E_0 = 27$  МПа.

На дневной поверхности откоса расположено сооружение, создающее вертикальную нагрузку на основание  $q = 0,15\gamma H$ , подошва откоса ослаблена полостью круглого сечения.

Расчетная схема откоса, приведенная на рис. 7, состоит из 1192 треугольных элементов, сопряженных в 656 узлах. Ширина матрицы жесткости системы 62. Генерация сетки конечных элементов схемы выполнена в среде AutoCAD, как описано выше (первый прием) [3], а расчеты, как и при рассмотрении первого примера, выполнены при помощи компьютерной программы [7].

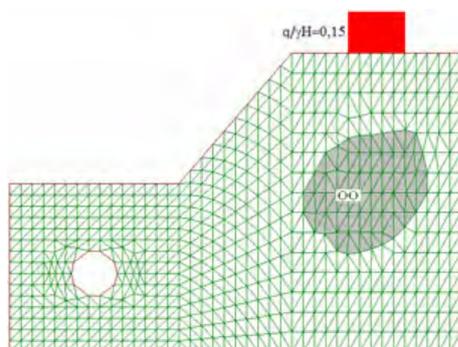


Рис. 7. Расчетная конечно-элементная схема откоса

В некоторый момент произошло замачивание области ослабления (ОО), что обусловило уменьшение прочностных свойств грунта. Отметим, что положение ОО специально выбрано таким образом, чтобы максимально влиять на устойчивость откоса.

Численные значения локального (в точке грунтового массива) и глобального (соответствующего следу наиболее вероятной поверхности скольжения) коэффициентов запаса устойчивости определяются выражениями [8] которые определяются численными значениями локальных и глобальных коэффициентов запаса устойчивости:

$$K_T = \frac{\left[ \frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_x) \cos 2\alpha + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_z) + \tau_{xz} \sin 2\alpha + \sigma_{св} \right] \operatorname{tg} \varphi}{\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_z) \sin 2\alpha + \tau_{xz} \cos 2\alpha}; \quad (1)$$

$$K = \frac{\int_0^l F_{уд}(S) ds}{\int_0^l F_{сд}(S) ds}, \quad (2)$$

где  $\sigma_z$ ;  $\sigma_x$ ;  $\tau_{xz}$  и  $\alpha$  — компоненты напряжения и угол ориентации площадки наиболее вероятного сдвига в точке грунтового массива;  $\sigma_{св} = C(\gamma H \operatorname{tg} \varphi)^{-1}$  — приведенное давление связности.

Для простоты считаем, что замачивание ОО привело к уменьшению модуля общей деформации в 10 раз, изменением прочностных свойств грунта в этой области пренебрежем.

На рис. 8 и 9 приведены картины изолиний компонент напряжений и перемещений в однородном откосе до и после замачивания, в следствии которого величина модуля общей деформации грунта в области ОО уменьшилась в 10 раз.

Анализ рисунков позволяет утверждать, что вдоль границ ослабленной области ОО произошла концентрация компонент напряжений и перемещений, а области пластических деформаций, развившиеся под краями фундамента, практически объемлют всю ослабленную зону.

Кроме того, в результате замачивания сильно изменились положение и форма следа наиболее вероятной поверхности скольжения. Почти треть его длины расположена внутри пластической области. А величина коэффициента запаса устойчивости снизилась с  $K_{дз} = 1,23$  до  $K_{пз} = 1,1$  т. е. на 11 %, где  $K_{дз}$  — коэффициент запаса устойчивости до замачивания,  $K_{пз}$  — после замачивания.

Выполнены дополнительные вычисления, в результате которых построены графические зависимости вида  $K = f(E_0/E_{00})$ , приведенные для ненагруженного и нагруженного откоса приведены на рис. 10. Из этих графиков видно, что в обоих случаях с увеличением отношения  $E_0/E_{00}$  величина  $K$  уменьшается по линейному закону, причем, погрешность линейной аппроксимации не превышает 5 %.

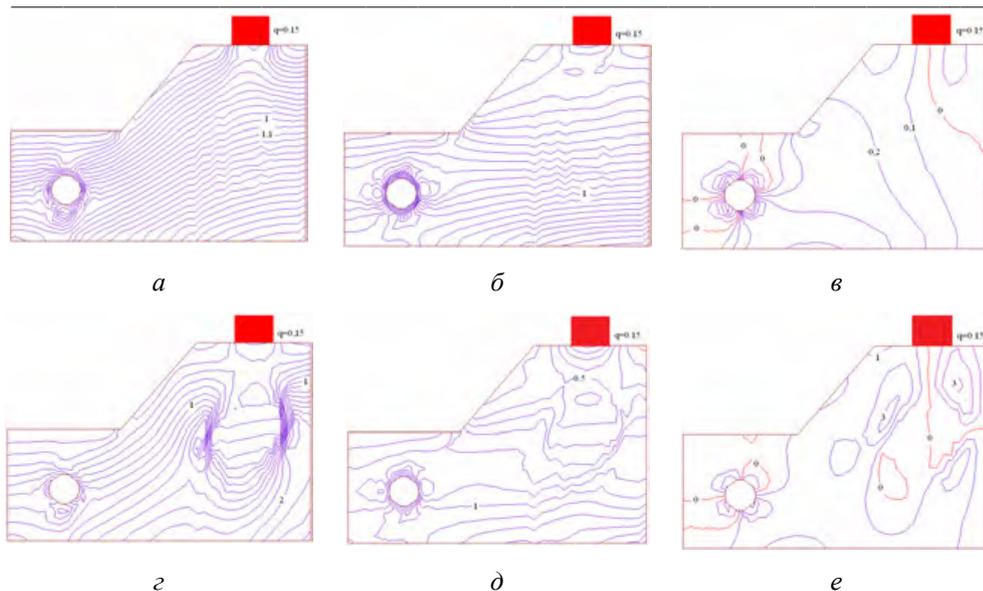


Рис. 8. Изолинии вертикальных  $\sigma_z$  (а, з), горизонтальных  $\sigma_x$  (б, д) и касательных  $\tau_{xz}$  (в, е) компонент напряжения в однородном откосе, ослабленном круглой полостью, соответственно до ( $E_0 = E_{00}$ ) и после замачивания области ОО ( $E_0 = 10E_{00}$ )

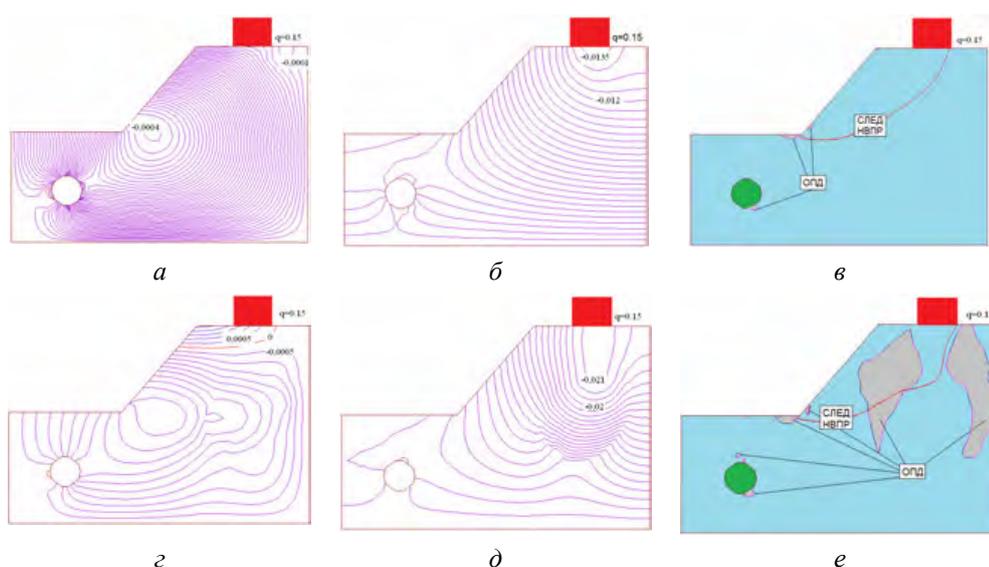


Рис. 9. Изолинии горизонтальных  $\delta_x$  (а, з) и вертикальных  $\delta_z$  (б, д) перемещений и областей пластических деформаций (в, е) в однородном откосе, ослабленном круглой полостью, соответственно до ( $E_0 = E_{00}$ ) и после замачивания области ОО ( $E_0 = 10E_{00}$ )

На основании всего выше изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Ослабление отдельных областей грунтовых массивов (оснований фундаментов и откосов) провоцирует начало сложного процесса трансформации полей напряжений и перемещений, результаты которого негативно сказываются на устойчивости исследуемых объектов.

2. Использование приемов генерации конечно-элементных расчетных схем [3] и компьютерной программы [6] позволяет успешно решать задачи о расчете напряженного состояния и устойчивости подработанных и ослабленных грунтовых массивов при условии, что будут известны размеры, форма и положение ослабленных областей и измененные значения физико-механические свойства грунтов, находящихся в ослабленных областях.

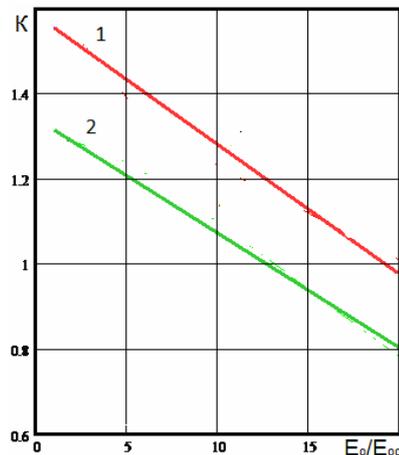


Рис. 10. Графики зависимости вида  $K = f(E_0/E_{00})$

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фадеев А. Б.* Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987. 221 с.
2. *Зенкевич О., Морган К.* Конечные элементы и аппроксимации. М.: Мир, 1986. 318 с.
3. *Богомолов А. Н., Степанов М. М.* Компьютерная программа для генерации конечно-элементной сетки на основе использования системы AutoCAD // Информационный листок № 51-065-01. Волгоград: ЦНТИ, 2001.
4. *Богомолов А. Н., Богомолов А. А.* Влияние жесткого штампа на напряженно-деформированное состояние грунтового основания // Материалы IV Международной науч.-технич. конф. «Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов». Ч. 3. Волгоград, 2005. С. 4—9.
5. *Богомолов А. Н., Богомолов А. А.* Влияние вида расчетной схемы на результаты численного моделирования процесса образования и развития областей пластических деформаций в однородном основании ленточного фундамента мелкого заложения // Материалы IV Международной науч.-технич. конф. «Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов». Ч. 3. Волгоград, 2005. С. 9—14.
6. Устойчивость (напряженно-деформированное состояние) : свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ : пат. Рос. Федерации № 2009613499 / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, М. Ю. Нестратов, Н. Н. Нестратов, Н. Н. Потапова, М. М. Степанов, А. Н. Ушаков ; опубл. 18.12.2009, Бюл. № 23 ; заявл. 19.05.2009 ; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 30.06.2009. 1 с.
7. *Богомолов А. Н.* Определение напряженного состояния сваи-стойки // Вестник ВолгГАСА. Сер.: Стр-во и архит. 1999. № 1. С. 29—34.
8. *Цветков В. К.* Расчет устойчивости откосов и склонов. Волгоград: Нижне-Волжское кн. изд-во, 1979. 238 с.

© *Богомолов А. Н., Богомолова О. А., Донсков Р. А., Пристансков А. А., Кузнецова С. В., Цветкова Е. В.* 2016

Поступила в редакцию  
в феврале 2016 г.

**Ссылка для цитирования:**

Устойчивость грунтового массива при подработке или ослаблении некоторой его области / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, Р. А. Донсков, А. А. Пристансков, С. В. Кузнецова, Е. В. Цветкова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 14—24.

**Об авторах:**

**Богомолов Александр Николаевич** — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой гидротехнических и земляных сооружений, проректор по научной работе, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; проф. кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, [banzaritcyn@mail.ru](mailto:banzaritcyn@mail.ru)

**Богомолова Оксана Александровна** — канд. техн. наук, доц. кафедры математики и информационных технологий, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [banzaritcyn@mail.ru](mailto:banzaritcyn@mail.ru)

**Донсков Роман Александрович** — аспирант кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

**Пристансков Андрей Александрович** — аспирант кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

**Кузнецова Светлана Васильевна** — д-р геол.-минерал. наук, профессор, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

**Цветкова Елена Владимировна** — канд. техн. наук, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [Elentsvetkova@yandex.ru](mailto:Elentsvetkova@yandex.ru)

**A. N. Bogomolov, O. A. Bogomolova, R. A. Donskov, A. A. Pristanskov,  
S. V. Kuznetsova, E. V. Tsvetkova**

**STABILITY OF SOIL MASSIF AT ITS UNDERWORKING  
OR WEAKENING OF SOME OF ITS AREA**

The article is about two techniques of final elements grid generation in case when there are natural or technogenic cavities or weakened zones of different configuration in the investigated area. The authors provide the examples of calculation of stress state and creation of areas of plastic deformations in underworked basis of a buried tape foundation and a slope weakened by round underground development and subsidence area. Pictures of isolines of tension, movements and limit areas are given.

**Key words:** final elements grid generation, stress state of underworked basis, weakened soil slope, decrease in physical and mechanical properties of soil, tension redistribution, loss of stability.

**REFERENCES**

1. Fadeev A. B. *Metod konechnykh elementov v geomekhanike* [Finite elements method in geomechanics]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 221 p.
2. Zenkevich O., Morgan K. *Konechnye elementy i approksimatsii* [Finite elements and approximations]. Moscow, Mir Publ., 1986. 318 p.
3. Bogomolov A. N., Stepanov M. M. [Computer programme for generation of finite-element grid based on the use of the AutoCAD system]. *Informatsionnyi listok TsNTI № 51-065-01* [Information sheet no. 51-065-01]. Volgograd, TsNTI, 2001.
4. Bogomolov A. N., Bogomolov A. A. [Influence of a rigid stamp on the stress strain condition of the soil foundation]. *Materialy IV Mezhdunarodnoi nauch.-tekhnich. konf. «Nadezhnost' i dolgovechnost' stroitel'nykh materialov, konstruksii i osnovanii fundamentov»*. Ch. 3 [Proc. of the IV

Int. sc.-tech. conf. "Safety and lifetime of construction materials, constructions and foundations bases". Pt. 3]. Volgograd, 2005, pp. 4—9.

5. Bogomolov A. N., Bogomolov A. A. [Influence of the type of calculation model on the results of numerical modeling of formation and development process in the areas of plastic deformations in uniform strip foundation of subsurface]. *Materialy IV Mezhdunarodnoi nauch.-tekhnich. konf. «Nadezhnost' i dolgovechnost' stroitel'nykh materialov, konstruktssii i osnovanii fundamentov»*. Ch. 3 [Proc. of the IV Int. sc.-tech. conf. "Safety and lifetime of construction materials, constructions and foundations bases". Pt. 3]. Volgograd, 2005, pp. 9—14.

6. Bogomolov A. N., Bogomolova O. A., Nestratov M. Yu., Nestratov N. N., Potapova N. N., Stepanov M. M., Ushakov A. N. *Ustoichivost' (napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie)* [Stability (stress-strain state)]. Patent RF, no. 2009613499, 2009.

7. Bogomolov A. N. [Determination of stress state of a compression pile]. *Vestnik Volgogradskoi gosudarstvennoi arkhitekturno-stroitel'noi akademii. Ser.: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of Volgograd State Academy of Civil Engineering and Architecture. Series: Civil Engineering and Architecture], 1999, no. 1, pp. 29—34.

8. Cvetkov V. K. *Raschet ustoichivosti otkosov i sklonov* [Calculation of stability of inner sides and slopes]. Volgograd, Nizhne-Volzhskoe Knizhnoe Izdatel'stvo, 1979. 238 p.

*For citation:*

Bogomolov A. N., Bogomolova O. A., Donskov R. A., Pristanskov A. A., Kuznetsova S. V., Tsvetkova E. V. [Stability of soil massif at its underworking or weakening of some of its area]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 14—24.

*About authors:*

**Bogomolov Aleksandr Nikolaevich** — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Vice-Rector for Scientific Research, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation; Professor of Construction Operations and Geotechnics Department, Perm National Research Polytechnic University. 29, Komsomolskii Prospect, Perm', 614990, Russian Federation, [banzaritcyn@mail.ru](mailto:banzaritcyn@mail.ru)

**Bogomolova Oksana Aleksandrovna** — Candidate of Engineering Science, Docent of Mathematics and Information Technology Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [banzaritcyn@mail.ru](mailto:banzaritcyn@mail.ru)

**Donskov Roman Aleksandrovich** — Postgraduate student of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

**Pristanskov Andrei Aleksandrovich** — Postgraduate student of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

**Kuznetsova Svetlana Vasil'evna** — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

**Tsvetkova Elena Vladimirovna** — Candidate of Engineering Science, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [Elentsvetkova@yandex.ru](mailto:Elentsvetkova@yandex.ru)

УДК 624.131.22

**А. Н. Богомолов<sup>а, б</sup>, Ю. И. Олянский<sup>а</sup>, Е. В. Щекочихина<sup>а</sup>, И. Ю. Кузьменко<sup>а</sup>,  
Е. А. Степанова<sup>а</sup>, Д. А. Чарыков<sup>а</sup>**

<sup>а</sup> *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

<sup>б</sup> *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

### **ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ, УЧИТЫВАЕМЫЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОСНОВАНИЙ И ФУНДАМЕНТОВ НА ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ**

На примере городов Волгоградской области и г. Кишинева проанализированы различные природные, техногенные и медико-биологические факторы, влияющие на экологическую оценку урбанизированных территорий, геоэкологическая среда которых представлена структурно-неустойчивыми набухающими и просадочными породами.

**Ключевые слова:** набухающие породы, просадочные породы, подтопление, деформация сооружений.

Интенсивное промышленно-хозяйственное освоение территорий, сложенных структурно-неустойчивыми просадочными и набухающими породами, неизбежно сопровождается повышением влажности грунтов оснований зданий и сооружений, вследствие чего нарушается существующее равновесие между приходными и расходными статьями водного баланса подземных вод, начинается их подъем. Это неизбежно влечет за собой возникновение таких неблагоприятных инженерно-геологических явлений, как подтопление, просадка, набухание, активизация древних оползней и образование новых. Здания и сооружения, возведенные на этих грунтах, неизбежно претерпевают деформации, происходит нарушение сплошности строительных конструкций, подвалы и подполья заполняются грунтовыми водами. Условия жизнеобитания населения существенно ухудшаются из-за возникновения ряда санитарно-гигиенических и медико-биологических факторов, негативно воздействующих на здоровье человека [1—3].

Проблеме подтопления территорий крупных городов юга России и сопредельных стран СНГ посвящена обширная библиография. На территории Молдовы изучение проблемы связано с исследованиями Ю. И. Олянского и В. С. Гончарова [4—6]. В Волгоградской области вопросам подтопления посвящены работы В. Н. Синякова, С. В. Кузнецовой [7] и др.

В Молдове подтоплением охвачены все большие города: Кишинев, Тирасполь, Бендеры. Однако наиболее интенсивно подтопление протекает в самом крупном городе — Кишиневе. Обобщение результатов многолетних наблюдений за уровнем подземных вод позволило выделить на территории города три основных района развивающегося подтопления: Рышкановка, Ботаника, Буюкань [8].

Микрорайон Рышкановка расположен на северной окраине города между балками Гульбочиха и Рышканской. Ширина водораздела составляет в среднем 1,5 км. Лессовый покров имеет максимальную мощность в средней части водораздела и достигает 20...25 м. По направлению склона мощность умень-

шается, в нижней части лессовый покров полностью отсутствует. Это преимущественно легкие и средние суглинки с числом пластичности 0,08...0,13, пористостью 0,39...0,46. Лессовый покров почти повсеместно подстилается глинами неогена, мощностью до 35...40 м.

Рышканская балка, ограничивающая территорию с востока, характеризуется значительно меньшим эрозионным врезом, здесь обнажаются глины неогена. Балки Гульбочиха и Рышканская открываются в долину р. Бык. В местах их контакта выделяются остатки второй надпойменной террасы. До начала застройки территория использовалась под сельскохозяйственные угодия. По данным геологических работ, выполненных УГ при СМ МССР в 1960—1970 гг., вода на кровле глин отсутствовала, за исключением южной части микрорайона, где она фиксировалась на глубине 5...10 м.

Застройка территории началась в конце 60-х гг. XX в., сначала на восточном склоне балки, затем на западном. В 1980—1981 гг. исследованиями Ю. И. Олянского установлено, что территория претерпевает активное подтопление. Максимальная высота подъема уровня достигла 10...12 м (рис. 1, а, б).

Микрорайон Батаника расположен на склоне водораздела между р. Бык и Ишновец и ограничен с северо-запада балкой Большая Малина, юго-востока Бачойской балкой, юго-запада — линией водораздела, северо-востока — долиной р. Бык. Ширина участка с запада на восток около 2 км. Максимальная мощность лессовой толщи достигает 20...25 м и приурочена к верхней части склона. Вниз по склону она уменьшается до 5...10 м. Лессовые породы представлены супесями и легкими суглинками с числом пластичности 0,03...0,13, пористостью 0,42...0,47. Они подстилаются мелкими и пылеватыми песками неогена. Максимальная мощность песков отмечена в районе водораздела. На отдельных участках в нижней части склона песчаная толща отсутствует, здесь лессовые породы подстилаются глинами сармата.

Застройка территории началась в 40-х гг. XX в. и осуществлялась в основном индивидуальным способом. По данным на период 1950—1960 гг. вода в лессовой толще отсутствовала. Ее уровень фиксировался в нижней части склона на глубине 20 м в сарматских глинах. Вследствие массовой застройки территории высотными зданиями в период с 1970 по 1980 гг. образовался техногенный водоносный горизонт. Сформировался региональный купол с центром, расположенным в нижней части склона. Высота подъема уровня воды достигла здесь 13...15 м (рис. 1, в, г).

Микрорайон Буюкань, характеризующийся аналогичными геологическими условиями с микрорайоном Ботаника, был застроен в 1960—1970 гг. Уже в 1980—1981 гг. здесь сформировался региональный купол подземных вод, смещенный к средней части склона (рис. 2).

Изучение подтопления на территории г. Кишинева позволило Ю. И. Олянскому составить ряд прогнозных карт, которые были использованы Институтом геофизики и геологии АН Молдовы при выполнении работ по сейсмическому микрорайонированию [6].

Аналізу подтопления городов Волгоградской области посвящены исследования В. Н. Синякова и С. В. Кузнецовой [7]. Они проследили динамику развития процесса во времени. Результаты представлены в табл.

Развитие подтопления на территории г. Волгограда

Годы	Количество подтопленных участков
1945—1955	6
1955—1965	32
1965—1975	87
1975—1990	420

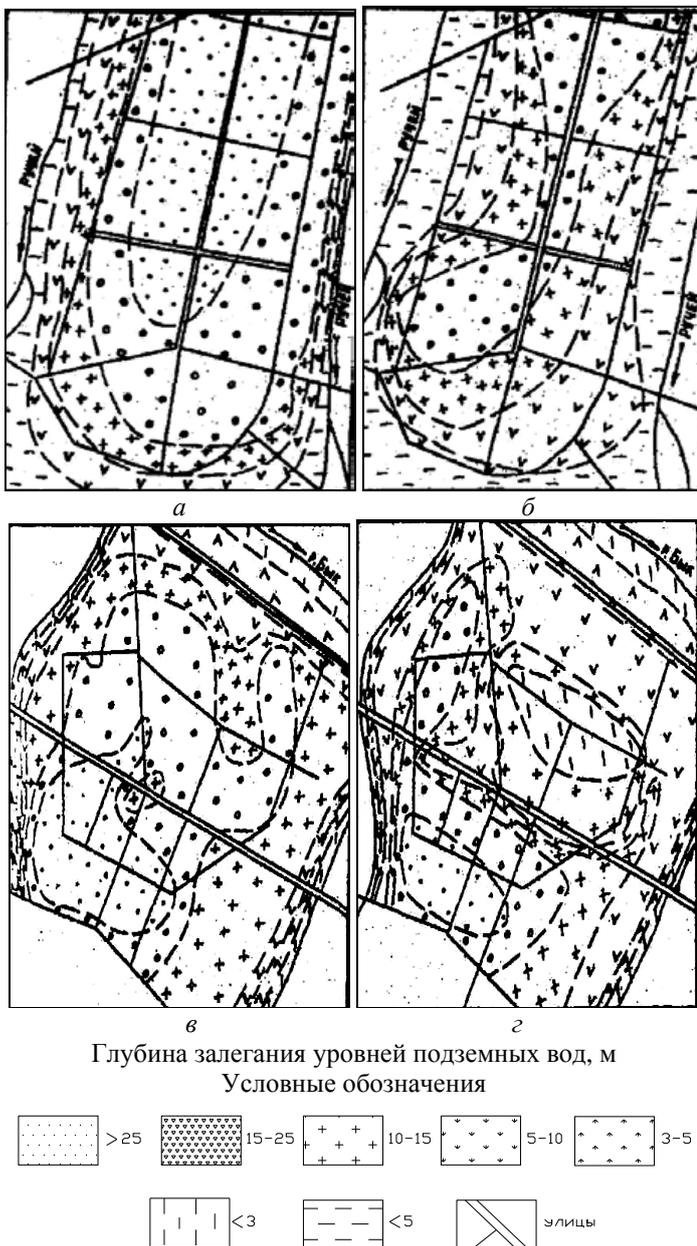


Рис. 1. Схематическая карта глубины залегания уровней подземных вод г. Кисинева на различный период (составил Ю.И. Олянский): *a* — микрорайон Рышкановка, глубина залегания уровней до застройки (1950 г.); *б* — то же, после застройки (1980—1981 гг.); *в* — микрорайон Ботаника, глубина залегания уровней до застройки (1950 г.); *г* — то же, после застройки (1980—1981 гг.)



Рис. 2. Схематические карты глубины залегания уровней подземных вод г. Кичинева на различный период (составил Ю. И. Олянский), микрорайон Буюкань. Условные обозначения см. рис. 1: *а* — глубина залегания подземных вод до застройки; *б* — после застройки

В последние годы подтопление активно развивается и в других городах области: Михайловке, Фролово, Урюпинске, Паласовке и др. Всего подтоплением охвачено 139 сельских населенных пунктов и все районные центры. Наиболее активно подтопление происходит в г. Волжском, построенном около 50 лет назад. За этот период уровень воды повысился с глубины 27 м до 3,5...5,0 м, скорость подъема составила 0,3...0,5 м в год. В Камышине в центре города сформировался техногенный водоносный горизонт с глубиной залегания уровня от 0,8 до 2,5 м, общая площадь подтопления составила 80 га. Причины подтопления городов Молдовы и Волгоградской области аналогичны другим городам России и сопредельных стран СНГ [1, 5, 9].

Строительство на просадочных и набухающих грунтах Молдовы и Волгоградской области в целом осуществляется успешно. Однако в ряде случаев наблюдается отдельные, иногда значительные деформации, связанные с про-

садкой и набуханием грунтов оснований. Просадочные деформации зданий и сооружений наблюдаются во всех крупных городах: Кишиневе, Тирасполе, Бендерах, Волгограде, Волжском, Камышине и др. Анализируя причины деформаций зданий и сооружений на просадочных грунтах в Молдове, Ю. И. Олянский [5] установил, что главными из них являются: некачественное производство работ по подготовке лессовых оснований и недостаточный комплекс мероприятий по борьбе с просадочностью при строительстве. Деформации, обусловленные первой причиной, носят единичный характер, но они наиболее значительны.

Так деформация 9-этажного семисекционного дома по ул. Богдан Водэ в г. Кишиневе вследствие аварийных утечек из затопленных подвалов достигла 180...200 мм. Некоторые секции на уровне параметров сомкнулись. Скорость осадки достигла 4 мм за 1 неделю. Для устранения кренов и стабилизации осадки было предпринято регулируемое замачивание грунтов в основании. Осадка при этом достигла 45...55 см, что вдвое превысила максимальную, прогнозируемую с учетом физико-механических характеристик грунта.

Деформации, связанные с недостаточным комплексом противопросадочных мероприятий на территории г. Кишинева, более массовые и исчисляются 10...20 новыми деформациями ежегодно. Причина их двоякая. Первая — целенаправленное сохранение просадочности в нижних горизонтах просадочной толщи на глубинах 10...14 м. Экономическое обоснование этому заключается в том, что затраты на ремонт данных сооружений гораздо меньше, чем стоимость работ по полному устранению просадочности в пределах всей просадочной толщи. Вторая — заключается в том, что, как показали исследования сотрудников ИГиГ АН Молдовы под руководством Ю. И. Олянского [9], метод компрессионных испытаний лессовых грунтов г. Кишинева по гостированной методике позволяет выявить только 60...70 % провальной просадочности. Неучтенной остается замедленная просадка и послепросадочное уплотнение, что в сумме может превышать в полтора-два раза деформацию грунта, определенную в компрессионном приборе. Особенно опасны такие деформации при аварийном замачивании грунтов основания, сопровождаемом длительной фильтрацией воды и как следствие значительным послепросадочным уплотнением.

Анализируя деформации зданий и сооружений на просадочных грунтах Волгоградской области, В. Н. Синяков и С. В. Кузнецова приводит следующие цифры: Волгоград и Волжский — 63, Камышин — 8 (на конец 1980-х гг.). В 90-х годах XX в. интенсивность деформаций нарастала. Причины деформаций — аналогичны вышеприведенным для г. Кишинева. Во всех случаях просадочные деформации, зданий и сооружений вследствие подтопления меньше деформаций вызванных аварийным замачиванием. Деформации зданий, обусловленные набуханием глинистых пород, широко представлены на территории г. Волгограда и области в целом и связаны с хвалынскими, майкопскими, мечеткинскими, юрскими и др. глинами. Только в Волгограде в результате набухания хвалынских глин в 70-х и 80-х годах XX в. было серьезно деформировано 82 здания и сооружения, в Камышине — 18, Волжском — 10. В Волгограде с набуханием глин майкопской серии связаны деформации 63 зданий и сооружений, мечеткинских глин — 12, скифских — 4, юрских — 5 [7].

Замачивание глинистых пород на склонах вследствие подтопления приводит к активизации древних и образованию новых оползней. Особенно интенсивно данный процесс протекает на территории г. Кишинева и других городов Молдовы. Застройка водоразделов, сложенных лессовыми породами подстилаемых неогеновыми глинами, влечет за собой их подтопление. Из-за увеличения фильтрации подземных вод на склонах, сложенных глинами, возникают оползни. Крупные оползневые проявления такого типа зарегистрированы в г. Кишиневе (мкр. Буюкань, ул. Флорилор, мкр. Будешть и др.). В г. Волгограде оползни образуются на крутосклонах хвалынской террасы и связаны с разгрузкой техногенного водоносного горизонта. Оползни этого типа прослеживаются вдоль р. Волги в Советском, Кировском и др. районах.

Анализ неблагоприятных геологических и биологических факторов, ухудшающих экологическую обстановку в крупных городах вследствие техногенеза, выполнен на примере г. Волгограда. Качество внутренней среды жилых и общественных зданий во многом определяет эффективность труда и отдыха, влияет на сохранение и укрепление здоровья всех возрастных и социальных групп населения. Обеспечение экологической безопасности жилища — одна из важнейших составных частей экологии человека, поскольку большинство современных горожан проводят в закрытых помещениях 10...23 ч в сут, из них до 14...16 ч в жилище.

По данным коммунального отдела центра государственного санитарно-эпидемиологического надзора г. Волгограда более половины жалоб, поступающих от населения, связано с неблагоприятными условиями проживания. В частности, они связаны с затопленными подвалами, образованием трещин в деформированных строительных конструкциях, проседанием лестничных маршей, заглубленных частей зданий и т. п. Анализ результатов обследований свидетельствует о том, что вследствие этого возникают факторы, ухудшающие санитарно-гигиенические условия жизнеобитания населения. Основными из них являются: повышенная влажность комнатного воздуха, грибковое загрязнение, плесень, увеличение популяций кровососущих комаров.

В помещениях с отсыревшими строительными конструкциями повышается влажность комнатного воздуха выше предельно допустимых величин. Авторы [10] считают оптимальной относительную влажность 30...60 %. Сочетание высокой влажности воздуха с низкой температурой вызывает быстрое переохлаждение организма за счет увеличения отдачи тепла. Продолжительное и частое пребывание людей в условиях повышенной влажности и низкой температуры отягощает течение таких заболеваний, как нефрит, полиневрит, ангина, ревматизм, пневмонию, катар верхних дыхательных путей, грипп.

Ю. Д. Губернским [9] установлено, что одним из основных факторов риска в развитии аллергопатологии в жилой среде все чаще является грибковое загрязнение воздуха из-за развития микрофлоры на сырых стеновых конструкциях [11]. Эти грибы являются не только аллергенами, но и приводят к аварийным ситуациям в зданиях и сооружениях. Под их влиянием дерево распадается на призматические частицы, теряет в массе, легко растирается в порошок (гнилушка) и полностью лишается своей конструктивной прочности.

Поверхности сырых стен, равно как и другие предметы, находящиеся в сырых помещениях, часто покрываются плесенью. Споры плесени, как результат ее жизнедеятельности, попадают в воздух помещений и содействуют

его порче. Кроме того, они оседают на коже и слизистых оболочках человека и способны вызвать целый ряд расстройств в организме человека.

В последние десятилетия в ряде городов России и стран СНГ наблюдается рост численности синантропных популяций кровососущих комаров, круглогодично размножающихся в подвальных помещениях жилых и общественных зданий. Комары являются не только злостными кровососами, но и переносчиками главным образом двух типов заболеваний — филяриатозов и вирусных энцефалитов.

Анализ исследований по влиянию изменений геосреды г. Волгограда на здоровье населения позволяет сделать следующие выводы:

1. Интенсивное промышленно-хозяйственное освоение территорий распространения просадочных и набухающих пород приводит к возникновению активных факторов преобразования геологической среды. Главнейшими из них являются статические и динамические нагрузки и изменение температурно-влажностного режима грунтов оснований. Проявление указанных факторов приводит к возникновению различных неблагоприятных инженерно-геологических процессов и явлений, таких как подтопление, просадка или набухание грунтов основания образование оползней и др.

2. Вследствие техногенеза изменяется состояние литогенной основы и возникает ряд неблагоприятных медико-биологических и санитарно-гигиенических факторов, влияющих на здоровье человека. Основными из них являются повышение влажности воздуха в жилых и общественных сооружениях, грибковые загрязнения, плесень, кровососущие насекомые. В результате повышается количество аллергенных, желудочно-кишечных, сердечно-сосудистых заболеваний, связанных с ослаблением иммунного потенциала организма человека, в целом снижается качество жизни.

3. Анализ всех негативных последствий техногенеза на территории г. Волгограда, характеризующейся широким распространением просадочных и набухающих пород, дает возможность использования выявленных закономерностей для прогноза эколого-геологических последствий освоения других территорий со сходными инженерно-геологическими условиями.

4. Выполненный анализ различных природных, техногенных и медико-биологических факторов, влияющих на геоэкологическую обстановку, позволил выполнить геоэкологическую оценку и районирование территории Волгоградской области по устойчивости геологической среды [1].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Геоэкологическая оценка территорий, сложенных лессовыми просадочными и набухающими породами / А. Н. Богомолов, Ю. И. Олянский, Е. В. Щекочихина, Е. П. Канашиная, А. Ф. Алексеев, Б. Ф. Галай // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 39(58). С. 82—93.

2. Олянский Ю. И., Богомолов А. Н., Тихонова Т. М. Сарматские глины. Состав, физико-механические свойства, типизация по устойчивости к обводнению. Германия: Palmarium academic publishing, 2013. 239 с.

3. Основные закономерности изменения состава и свойств сарматских глин при диффузионном выщелачивании / А. Н. Богомолов, Ю. И. Олянский, О. А. Богомолова, И. Ю. Кузьменко, С. А. Чарыкова. Волгоград: ВолгГАСУ, 2013. 127 с.

4. Олянский Ю. И. К вопросу обводнения лессовых грунтов территории междуречья Прут — Днестр // Вопросы исследования лессовых грунтов и методов возведения фундаментов на них. Ростов н/Д: РИСИ, 1985. С. 86—93.

5. Гончаров В. С., Олянский Ю. И. Анализ причины деформаций зданий и сооружений, связанных с обводнением просадочных грунтов на территории Молдавии // Ускорение научно-технического прогресса в фундаментостроении. Т. II. М.: Стройиздат, 1987. С. 164—165.

6. Олянский Ю. И. Лессовые грунты юго-западного Причерноморья (в пределах республики Молдова). Кишинев: Штиинца, 1992. 130 с.

7. Синяков В. Н., Кузнецова С. В. Современные геологические процессы на территории Волгоградской агломерации: анализ, прогноз, принципы и перспективы управления. Деп. в ВИЭМС от 27.01.87. №358-МТ.

8. Прогноз подтопления урбанизированных территорий / Ю. И. Олянский, В. А. Перфилов, С. И. Махова, И. Ю. Кузьменко, С. А. Чарыкова // Геология, география и глобальная гигиена и санитария. 1993. С. 53—56.

9. Изменение состава и свойств лессовых пород при техническом обводнении / А. Н. Богомоллов, Ю. И. Олянский, Е. В. Щекочихина, Т. М. Тихонова, И. Ю. Кузьменко. Волгоград: ВолГАСУ, 2015. 204 с.

10. Губернский Ю. Д., Калинина И. В., Текшева Л. М. Обоснование классификации качества жилой среды // Гигиена и санитария. 1993. № 12. С. 53—56.

11. Микроорганизмы и низшие растения — разрушители материалов и изделий / под. ред. М. В. Горленко. М.: Медицина, 1979. С. 47—81.

© А. Н. Богомоллов, Ю. И. Олянский, Е. В. Щекочихина, И. Ю. Кузьменко, Е. А. Степанова,  
Д. А. Чарыков, 2016

Поступила в редакцию  
в феврале 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Экологические аспекты изменения геологической среды, учитываемые при проектировании оснований и фундаментов на глинистых грунтах / А. Н. Богомоллов, Ю. И. Олянский, Е. В. Щекочихина, И. Ю. Кузьменко, Е. А. Степанова, Д. А. Чарыков // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 25—34.

Об авторах:

**Богомоллов Александр Николаевич** — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой гидротехнических и земляных сооружений, проректор по научной работе, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; проф. кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, [banzaritcyn@mail.ru](mailto:banzaritcyn@mail.ru)

**Олянский Юрий Иванович** — д-р геол.-минерал. наук, доц., проф. кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [olyansk@list.ru](mailto:olyansk@list.ru)

**Щекочихина Евгения Викторовна** — канд. геол.-минерал. наук, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [karnat.1@yandex.ru](mailto:karnat.1@yandex.ru)

**Кузьменко Ирина Юрьевна** — аспирант кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [olyansk@list.ru](mailto:olyansk@list.ru)

**Степанова Екатерина Александровна** — аспирант кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [ekserstepan@bk.ru](mailto:ekserstepan@bk.ru)

**Чарыков Денис Анатольевич** — аспирант кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [ekserstepan@bk.ru](mailto:ekserstepan@bk.ru)

**A. N. Bogomolov, Yu. I. Olyanskii, E. V. Shchekochikhina, I. Yu. Kuz'menko,  
E. A. Stepanova, D. A. Charykov**

## **ECOLOGICAL ASPECTS OF CHANGES IN GEOLOGICAL ENVIRONMENT TAKEN INTO ACCOUNT AT DESIGN OF BASES AND FOUNDATIONS ON CLAY GROUND**

By the examples of the cities in Volgograd Oblast and Kishinev city the authors analyze a variety of natural, technogenic and biomedical factors influencing the geo-ecological assessment of urbanized areas the geo-ecological environment of which is formed by structurally unstable swelling and subsiding soils.

**Key words:** swelling rock, rock subsidence, flooding, deformation of structures.

### REFERENCES

1. Olyanskii Yu. I., Shchekochikhina E. V., Kanashinskaya E. P., Alekseev A. F., Galai B. F. [Geocological assessment of the territories formed by loessial sagging and swelling rocks]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 39(58), pp. 82—93.
2. Olyanskii Yu. I., Bogomolov A. N., Tikhonova T. M. *Sarmatskie gliny. Sostav, fiziko-mekhanicheskie svoistva, tipizatsiya po ustoichivosti k obvodneniyu* [Sarmatian clays. Structure, physical and mechanical properties, type designs by resistance to water supply]. Palmarium academic Publishing House, Germany, 2013, 239 p.
3. Bogomolov A. N., Olyanskii Yu. I., Bogomolova O. A., Kuz'menko I. Yu., Charykova S. A. *Osnovnye zakonomernosti izmeneniya sostava i svoistv sarmatskikh glin pri diffuzionnom vyshchela-chivanii* [Main regularities of change in structure and properties of Sarmatian clays at diffusive leaching]. Volgograd, VSUACE Publ., 2013. 127 p.
4. Olyanskii Yu. I. [To the issue of water supply of loess soils in the interstream area of the Prut and the Dniester]. *Voprosy issledovaniya lessovykh gruntov i metodov vozvedeniya fundamentov na nikh* [Issues concerning the research of loess soils and methods of construction of foundations on them]. Rostov-on-Don, RISI Publ., 1985, pp. 86—93.
5. Goncharov V. S., Olyanskii Yu. I. [Analysis of the reasons of deformation of buildings and constructions that are connected with watering of collapsible soils on the territory of Moldova]. *Uskorenie nauchno-tehnicheskogo progressa v fundamentostroenii. T. II* [Activation of scientific and technical progress in foundation engineering. Vol. II]. Moscow, Stroizdat Publ., 1987. Pp. 164—165.
6. Olyanskii Yu. I. *Lessovye grunty yugo-zapadnogo Prichernomor'ya (v predelakh respublik Moldova)* [Loess soils in the south-west Black Sea region (within the Republic of Moldova)]. Kishinev, 1992. 130 p.
7. Sinyakov V. N., Kuznetsova S. V. *Sovremennyye geologicheskie protsessy na territorii Volgogradskoi aglomeratsii: analiz, prognoz, printsipy i perspektivy upravleniya* [Modern geological processes on the territory of Volgograd agglomeration: analysis, forecast, principles and prospects of management]. Dep. in VIEMS from 27.01.87.#358-MT.
8. Olyanskii Yu. I., Perfilov V. A., Makhova S. I., Kuz'menko I. Yu., Charykova S. A. [Flooding forecast for urbanized territories]. *Geologiya, geografiya i global'naya gigiena i sanitariya* [Geology, geography and global hygiene and sanitary], 1993, pp. 53—56.
9. Bogomolov A. N., Olyanskii Yu. I., Shchekochikhina E. V., Tikhonova T. M., Kuz'menko I. Yu. *Izmenenie sostava i svoistv lessovykh porod pri tekhnicheskoi obvodnenii* [Change of structure and properties of loess rocks at technical water supply]. Volgograd, VSUACE Publ., 2015. 204 p.
10. Gubernskii Yu. D., Kalinina I. V., Teksheva L. M. [Justification of classification of the quality of living environment]. *Gigiena i sanitariya* [Hygiene and Sanitation], 1993, no. 12, pp. 53—56.
11. Gorlenko M. V., ed. *Mikroorganizmy i nizshie rasteniya – razrushiteli materialov i izdelii* [Microorganisms and lower plants — destroyers of materials and products] under the editorship]. Moscow, Medicina Publ., 1979. Pp. 47—81.

*For citation:*

Bogomolov A. N., Olyanskii Yu. I., Shchekochikhina E. V., Kuz'menko I. Yu., Stepanova E. A., Charykov D. A. [Ecological aspects of changes in geological environment taken into account at design of bases and foundations on clay ground]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 25—34.

*About authors:*

**Bogomolov Aleksandr Nikolaevich** — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Vice-Rector for Scientific Research, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation; Professor of Construction Operations and Geotechnics Department, Perm National Research Polytechnic University

**Olyanskii Yurii Ivanovich** — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Docent, Professor of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [olyansk@list.ru](mailto:olyansk@list.ru)

**Shchekochikhina Evgeniya Viktorovna** — Candidate of Geological and Mineralogical Science, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [karnat.1@yandex.ru](mailto:karnat.1@yandex.ru)

**Kuz'menko Irina Yur'evna** — Postgraduate student of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [olyansk@list.ru](mailto:olyansk@list.ru)

**Stepanova Ekaterina Aleksandrovna** — Postgraduate student of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [ekserstepan@bk.ru](mailto:ekserstepan@bk.ru)

**Charykov Denis Anatol'evich** — Postgraduate student of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [ekserstepan@bk.ru](mailto:ekserstepan@bk.ru)

УДК 691.175.2:620.17

**А. Б. Бондарев<sup>а</sup>, Б. А. Бондарев<sup>б</sup>, П. В. Борков<sup>б</sup>, Р. Ю. Сапрыкин<sup>б</sup>**

<sup>а</sup> ООО «ЛипецкНИЦСтройпроект»

<sup>б</sup> Липецкий государственный технический университет

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОПОЛЗУЧЕСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОНСТРУКЦИЯХ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ**

Представлены результаты экспериментальных исследований полимерных композиционных материалов в условиях повторно-переменных нагружений. Установлены стадии развития деформаций виброползучести полимерных композитов. Получены зависимости деформаций виброползучести полимерных композитов от величины коэффициента асимметрии цикла.

**Ключевые слова:** полимерный композиционный материал, виброползучесть, циклические испытания.

Вопросам повышения надежности и долговечности материалов в конструкциях транспортных сооружений уделяется достаточно пристальное внимание. В современной производственной практике популярность среди строительных материалов получили полимерные композиты [1]. Но широкое использование подобных материалов в строительстве, в том числе транспортном, ограничивается недостаточностью информации об особенностях их работы в различных эксплуатационных условиях. Подобные материалы наиболее выгодно использовать в транспортном строительстве при ремонте и восстановлении мостов и путепроводов из бетона и железобетона [2]. В связи с этим особое внимание следует уделять изучению свойств полимерных композиционных материалов (ПКМ) в условиях повторно-переменных (циклических) нагрузок.

В механике твердого деформированного тела обычно предполагается, что наложение малых колебаний на статическую нагрузку не влияет на общую характеристику деформируемого материала [3]. Существующие уравнения состояния в случае нагружения с накоплением малых вибраций дают характеристики, мало отличающиеся от аналогичных параметров для процесса, протекающего без возмущения. Наряду с этим, для ряда материалов при определенных условиях наблюдается резкое изменение характеристик деформирования при наличии циклических нагрузок [4, 5]. В то же время кривые виброползучести схожи с кривыми ползучести при статической нагрузке. И здесь можно выделить три стадии их развития: неустановившуюся, установившуюся и ускоренную (рис. 1).

Первая стадия виброползучести характеризуется монотонным уменьшением скорости деформации. Далее следует стадия, в течение которой проявляется линейная зависимость деформации от количества циклов нагружения. Скорость деформации при этом остается практически постоянной и зависит от уровня нагружения. Третья стадия виброползучести характеризуется непрерывно возрастающей скоростью деформации ( $V \rightarrow \infty$ ), приводящей к разрушению материала конструкций. Описание деформации виброползучести

методами статической ползучести требует уточнений, так как наложение на статическую нагрузку дополнительных циклических нагружений может усиливать деформируемость материала или замедлять этот процесс. Для равных уровней максимальных напряжений в первом случае кривые виброползучести располагаются выше кривых статической ползучести, во втором — ниже. При этом развитие деформаций виброползучести во времени идет быстрее, чем деформаций статической ползучести. Таким образом, виброползучесть — это особое качественное свойство материала, проявляющееся только при действии длительных асимметричных циклических нагрузок. Отсюда следует, что анализ деформаций виброползучести должен базироваться на экспериментальных данных из-за нелинейных синергических изменений в материале конструкций, вызванных взаимодействием статических и циклических нагрузок [5].

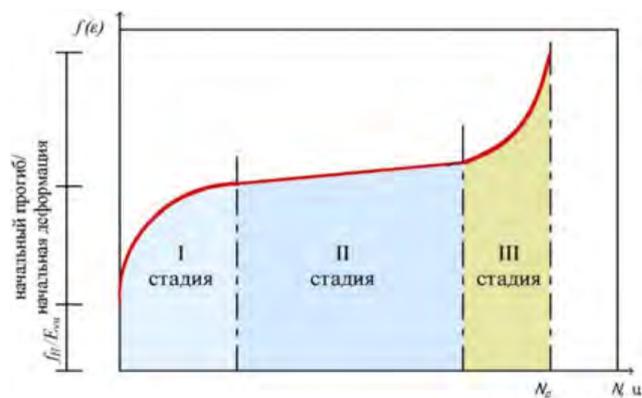


Рис. 1. Кривая виброползучести

Работами А. С. Прокофьева [6, 7], С. С. Сморгочкова [8], С. В. Поветкина [9], В. А. Кабанова [10] для древесины и П. Г. Левченко [11], Б. А. Бондарева [12] для полимербетонных составов установлено, что деформации виброползучести могут служить индикатором повреждаемости материала конструкции и использоваться для определения предела выносливости и оценки циклической долговечности полимерных композиционных материалов (ПКМ). При этом нагрузка, соответствующая пределу выносливости, определялась по образцу с наибольшим нагружением, полностью прекратившем деформирование. Превышение этой нагрузки приводит к незатухающему деформированию. Метод определения пределов выносливости по кривым виброползучести выгодно отличается от существующих. Сведения о деформации образца, получаемые в момент его испытания, позволяют прогнозировать его долговечность, что дает возможность сократить срок испытания, лучше ориентироваться в назначении нагрузки на следующие образцы, точнее и быстрее определять нагрузки, соответствующие пределу выносливости. Все это позволяет качественно провести испытания всей серии элементов [8, 13].

Число наблюдений  $n$  определяется в зависимости от изменчивости изучаемого признака и свойства, выражаемого коэффициентом изменчивости, точности исследования, выражаемого показателем точности, и от принятия вероятности получаемого результата, выражаемого показателем достоверно-

сти. Зная коэффициент изменчивости  $V$ , %, точности  $P$ , % и показатель достоверности  $t$ , число наблюдений  $n$  определяется по формуле

$$n = \frac{V^2 t^2}{P^2},$$

где  $V$  — коэффициент изменчивости;  $P$  — точность эксперимента;  $t$  — показатель достоверности [14].

Таким образом, для определения статистически достоверных результатов при изучении деформаций виброползучести необходимо испытать 15 образцов.

Матрица, приведенная в табл. 1, соответствует математической модели объекта исследования:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_{12} + b_{13} X_{13} + b_{23} X_{23} + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2.$$

Т а б л и ц а 1

*Матрица планирования эксперимента*

Номер опыта	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_3^2$	$Y$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	$18,4 \cdot 10^{-4}$
2	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	$21,5 \cdot 10^{-4}$
3	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	$18,6 \cdot 10^{-4}$
4	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	$22,0 \cdot 10^{-4}$
5	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	$18,7 \cdot 10^{-4}$
6	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	$19,6 \cdot 10^{-4}$
7	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	$19,7 \cdot 10^{-4}$
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	$20,0 \cdot 10^{-4}$
9	+1	-1,215	0	0	0	0	0	$19,3 \cdot 10^{-4}$
10	+1	+1,215	0	0	0	0	0	$19,2 \cdot 10^{-4}$
11	+1	0	-1,215	0	0	0	0	$19,8 \cdot 10^{-4}$
12	+1	0	+1,215	0	0	0	0	$20,0 \cdot 10^{-4}$
13	+1	0	0	-1,215	0	0	0	$20,2 \cdot 10^{-4}$
14	+1	0	0	+1,215	0	0	0	$20,5 \cdot 10^{-4}$
15	+1	0	0	0	0	0	0	$20,0 \cdot 10^{-4}$

В табл. 2 приведены уровни варьирования усталостных характеристик при испытаниях полимербетона ФАМ.

Т а б л и ц а 2

*Уровни варьирования усталостных характеристик при испытаниях полимербетона ФАМ*

Факторы	Нижний уровень	Основной уровень	Верхний уровень	Интервал варьирования
Коэффициент асимметрии цикла, $\rho$ ( $X_1$ )	0,1	0,35	0,60	0,25
Количество циклов до разрушения, $N$ ( $X_2$ )	$1,5 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^6$	$0,5 \cdot 10^6$
Коэффициент выносливости, $K_{b,pul}$ ( $X_3$ )	0,35	0,40	0,45	0,05

Математическая модель может быть преобразована из кодированных переменных в абсолютные, тогда

$$\varepsilon_{bn} = 23,018 + 0,49\rho + 0,456N + 2,16K_{b,pul} + 0,417\rho N + 1,75\rho K_{b,pul} + 0,08NK_{b,pul} - 1,797\rho^2 - 1,03N^2 - 0,759K_{b,pul}^2$$

Ранее установлено, что при развитии деформаций виброползучести различают три их стадии: неустановившуюся, установившуюся и ускоренную (или лавинную). В соответствии с этой классификацией первая стадия виброползучести характеризуется монотонным уменьшением скорости деформации. За ней следует стадия, в течение которой проявляется линейная зависимость деформаций от количества циклов нагружения. При этом скорость деформации остается практически постоянной и зависит от уровня нагружения. Третья стадия виброползучести характеризуется непрерывно возрастающей скоростью деформации, приводящей к разрушению материала элемента конструкции.

На рис. 2—4 приведены кривые деформации виброползучести полимербетона при коэффициентах асимметрии циклов  $\rho = 0, 1; 0,35; 0,6$  соответственно.

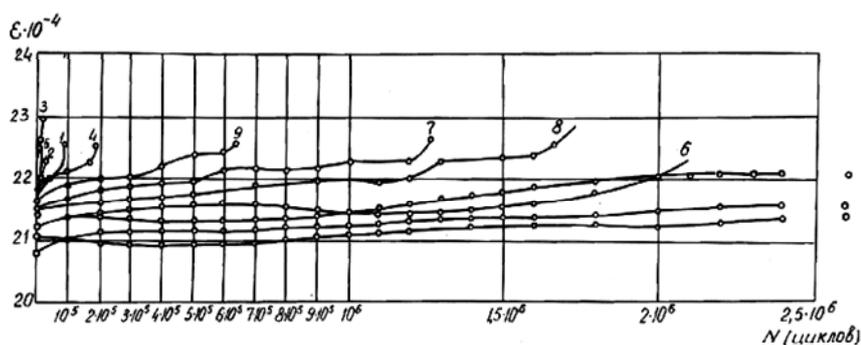


Рис. 2. Кривые деформации виброползучести сжатых полимербетонных элементов при  $\rho = 0,1$  и уровнях нагружения: 3 —  $0,66R_b$ ; 2 —  $0,6R_b$ ; 5 —  $0,55R_b$ ; 1 —  $0,50R_b$ ; 4 —  $0,48R_b$ ; 9 —  $0,46R_b$ ; 7 —  $0,44R_b$ ; 8 —  $0,40R_b$ ; 6 —  $0,32R_b$ ; 12 —  $0,32R_b$ ; 11 —  $0,26R_b$ ; 10 —  $0,24R_b$

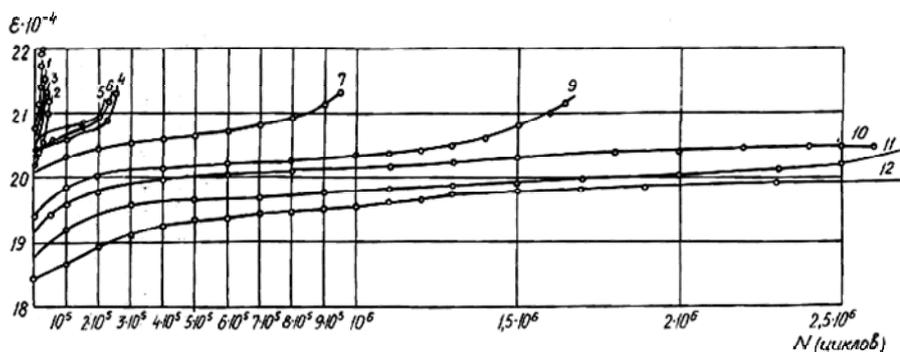


Рис. 3. Кривые деформации виброползучести сжатых полимербетонных элементов при  $\rho = 0,35$  и уровнях нагружения: 3 —  $0,6R_b$ ; 1 —  $0,58R_b$ ; 2 —  $0,54R_b$ ; 6 —  $0,52R_b$ ; 5 —  $0,5R_b$ ; 4 —  $0,48R_b$ ; 7 —  $0,46R_b$ ; 8 —  $0,57R_b$ ; 9 —  $0,42R_b$ ; 10 —  $0,4R_b$ ; 11 —  $0,38R_b$ ; 12 —  $0,36R_b$

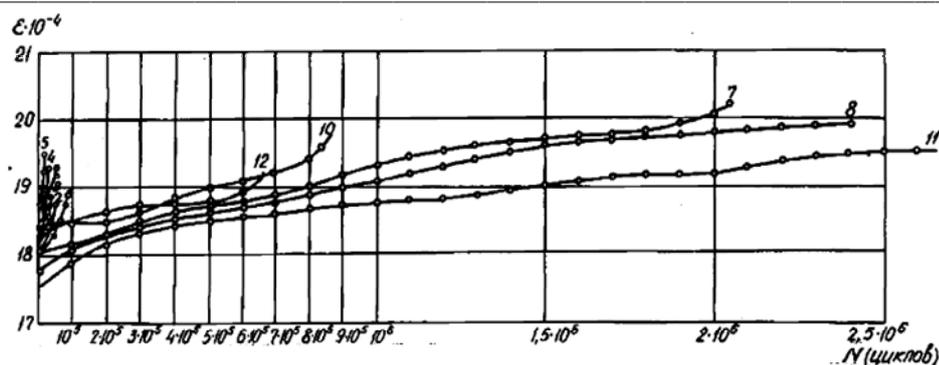


Рис. 4. Кривые деформации виброползучести сжатых полимербетонных элементов при  $\rho = 0,6$  и уровнях загрузки: 5 —  $0,7R_b$ ; 4 —  $0,65R_b$ ; 1 —  $0,6R_b$ ; 3 —  $0,58R_b$ ; 9 —  $0,56R_b$ ; 2 —  $0,54R_b$ ; 6 —  $0,52R_b$ ; 12 —  $0,5R_b$ ; 10 —  $0,48R_b$ ; 7 —  $0,46R_b$ ; 8 —  $0,44R_b$ ; 11 —  $0,42R_b$

На рис. 5—7 приведены поверхности отклика при количестве циклов приложения нагрузки  $N = 1,5 \cdot 10^6$ ;  $N = 2,0 \cdot 10^6$ ;  $N = 2,5 \cdot 10^6$  соответственно.

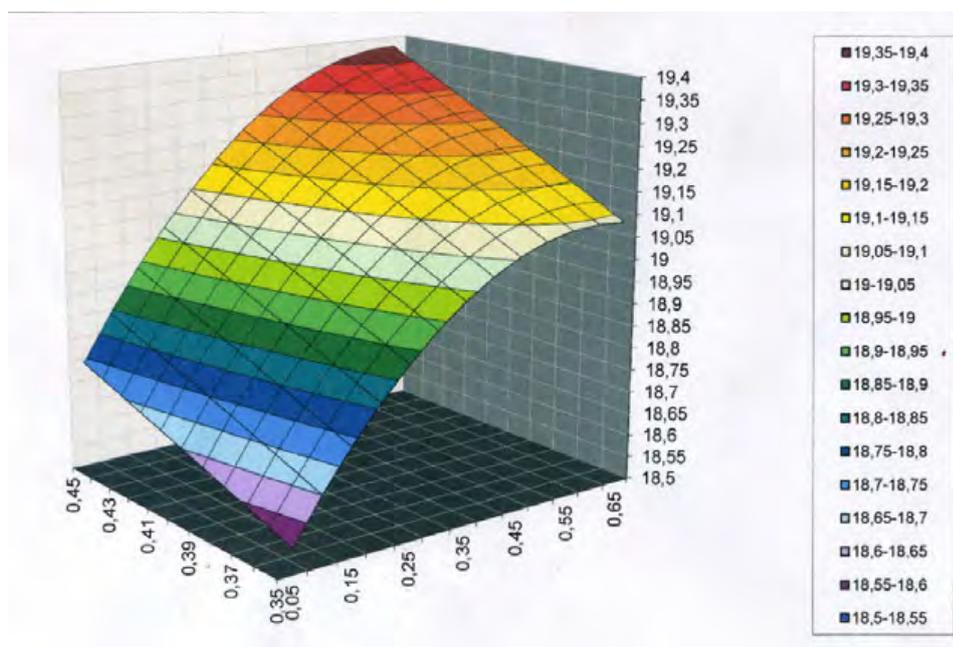


Рис. 5. Поверхность отклика при  $N = 1,5 \cdot 10^6$

В зависимости от уровня нагружения и коэффициента асимметрии цикла развитие деформаций виброползучести может протекать различно. К концу стадии неустановившихся деформаций виброползучести в зависимости от соотношения скоростей деформирования и релаксации напряжений деформации могут носить нарастающий, установившийся или затухающий характер.

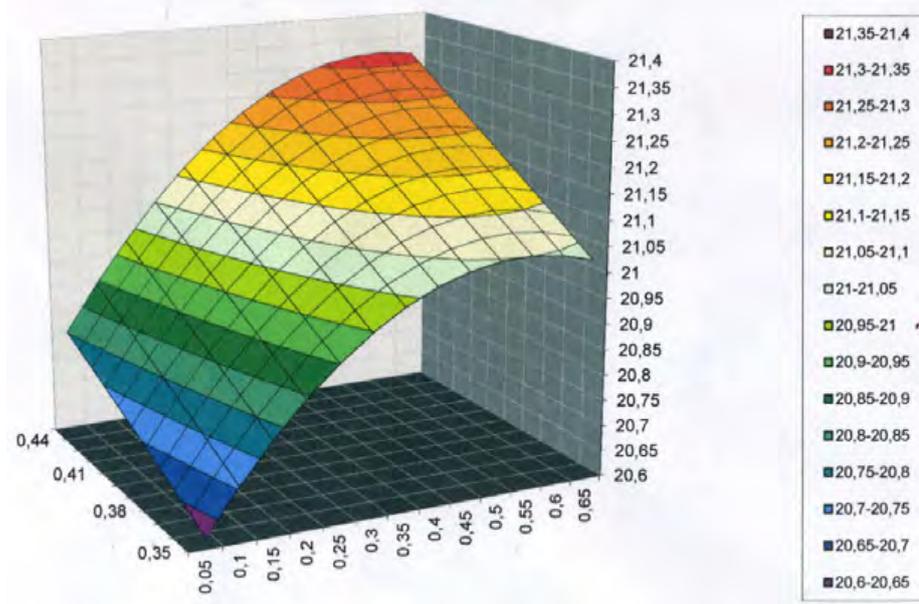


Рис. 6. Поверхность отклика при  $N = 2,0 \cdot 10^6$

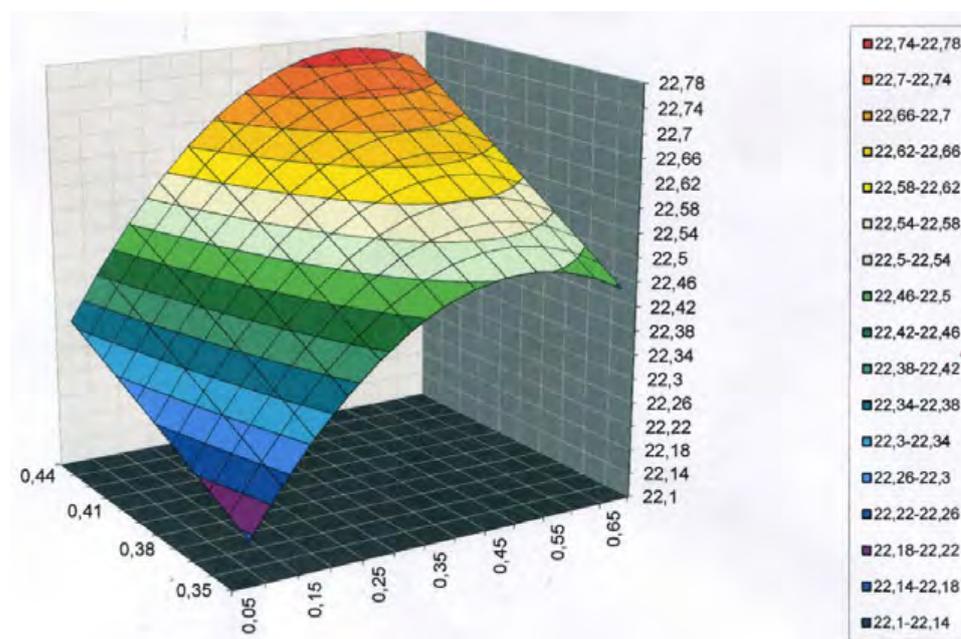


Рис. 7. Поверхность отклика при  $N = 2,5 \cdot 10^6$

Так, при  $\frac{\sigma_{\max}}{R_b} = 0,66; 0,6; 0,5$  локальные напряжения, вызванные неоднородностью структуры полимербетона, не успевают отрелаксировать за цикл «нагрузка — разгрузка» и, складываясь с остаточными, превышают прочность структурных связей. Деформации виброползучести монотонно нара-

тают, и разрушение происходит на этой стадии. При уровнях загрузки, равных 0,46; 0,44; 0,4, между процессами деформирования и релаксации напряжений к концу первой стадии устанавливается динамическое равновесие.

Дальнейшее деформирование определяется микроразрушениями и связано с концентрацией субмикротрещин в объеме материала конструкции. При уровнях нагружения, равных  $0,32R_b$ ,  $0,3R_b$ , релаксационные процессы на неустановившейся стадии могут снизить локальные перенапряжения до такого уровня, при котором разрыв структурных связей станет маловероятным. Деформации виброползучести носят затухающий характер и в дальнейшем стабилизируются, и циклическая долговечность, характеризуемая количеством циклов, стремится к бесконечности.

Отсюда можно сделать вывод о том, что деформации виброползучести служат индикатором повреждаемости материала конструкции и используются при оценке предела выносливости и циклической долговечности полимерных композиционных материалов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новые технологии и материалы в производстве и строительстве: вопросы проектирования, разработки и внедрения / В. В. Белозеров, П. В. Борков, С. А. Кобелева, С. Н. Олейников, Р. Р. Насыров, Р. Р. Даминов. М.: Перо, 2012. 148 с.
2. Ремонт и восстановление элементов конструкций транспортных сооружений с использованием полимерных композиционных материалов / А. Б. Бондарев, П. В. Борков, Б. А. Бондарев, В. А. Жариков // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 39(58). С. 17—25.
3. Баренблатт Г. И., Козырев Ю. И., Машинин Н. И. О виброползучести полимерных материалов // ПМТФ. 1965. № 5. С. 68—75.
4. Ашкенази Е. К. Анизотропия механических свойств некоторых стеклопластиков. М.: Изд-во ПМТФ, 1969. 210 с.
5. Прокофьев А. С., Кабанов В. А., Сморгачев А. А. Проектирование строительных конструкций с учетом усталости. Тула: Изд-во ТПИ, 1988. 105 с.
6. Прокофьев А. С. Диаграммы усталостных разрушений древесины // Облегченные конструкции из древесины, фанеры и пластмасс: тр. ЛИСИ. Л.: ЛИСИ, 1984. С. 42—46.
7. Прокофьев А. С. Усталость древесины // Известия вузов. Строительство. 1985. № 2. С. 18—21.
8. Сморгачев А. А. Выносливость и виброползучесть клееных деревянных балок: дис... канд. техн. наук. М., 1982. 24 с.
9. Поветкин С. В. Выносливость деревянных клеевых элементов при изгибе: дис... канд. техн. наук. Воронеж, 1988. 22 с.
10. Кабанов В. А. Влияние температурно-влажностных воздействий на прочность и выносливость клееных деревянных балок: дис... канд. техн. наук. Л., 1983. 24 с.
11. Левченко П. Г. Сопrotивляемость конструкций из фурфурол-ацетонового сталеполимербетона однозначному пульсирующему нагружению: дис... канд. техн. наук. Воронеж, 1971. 20 с.
12. Бондарев Б. А. Сопrotивляемость полимербетонных строительных элементов, армированных стеклопластиковой арматурой, циклическим нагружением: дис... канд. техн. наук. Воронеж, 1990. 26 с.
13. Соломатов В. И., Бобрышев А. И., Хамлер К. Г. Развитие полиструктурной теории композиционных строительных материалов // Известия вузов. Строительство. 1985. № 8. С. 58—64.
14. Леонтьев Н. Л. Техника статистических вычислений. М.: Лесная промышленность, 1966. 249 с.
15. Красовский Г. И. Планирование экспериментов. М.: МГУ, 1982. 210 с.

© Бондарев А. Б., Бондарев Б. А., Борков П. В., Сапрыкин Р. Ю., 2016

Поступила в редакцию  
в феврале 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Исследование виброползучести полимерных композиционных материалов в конструкциях транспортных сооружений при циклических испытаниях / А. Б. Бондарев, Б. А. Бондарев, П. В. Борков, Р. Ю. Сапрыкин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 35—43.

Об авторах:

**Бондарев Александр Борисович** — канд. техн. наук, генеральный директор, ООО «Липецк-НИЦСтройпроект», [Talex\\_86@mail.ru](mailto:Talex_86@mail.ru)

**Бондарев Борис Александрович** — д-р техн. наук, проф., проф. кафедры строительных материалов и конструкций, Липецкий государственный технический университет. Российская Федерация, 398600, г. Липецк, ул. Московская, 30, [LNSP-48@mail.ru](mailto:LNSP-48@mail.ru)

**Борков Павел Валерьевич** — канд. техн. наук, доцент, Липецкий государственный технический университет. Российская Федерация, 398600, г. Липецк, ул. Московская, 30, [borkovpv@mail.ru](mailto:borkovpv@mail.ru)

**Сапрыкин Роман Юрьевич** — аспирант кафедры строительного материаловедения и дорожных технологий, Липецкий государственный технический университет. Российская Федерация, 398600, г. Липецк, ул. Московская, 30, [ic-cup@bk.ru](mailto:ic-cup@bk.ru)

**A. B. Bondarev, B. A. Bondarev, P. V. Borkov, R. Yu. Saprykin**

## STUDY OF VIBROCREEP POLYMER COMPOSITE MATERIALS IN THE DESIGN OF TRANSPORT CONSTRUCTIONS AT CYCLIC TESTS

The article presents the results of experimental studies of polymer composite materials under repeated variable loading. The stages of development of vibrocreep deformations of polymer composites are determined. The authors receive the results of dependence of vibrocreep deformations of polymer composites on the magnitude of cycle asymmetry coefficient.

**Key words:** polymer composite, vibrocreep, cyclic tests.

### REFERENCES

1. Belozеров V. V., Borkov P. V., Kobeleva S. A., Oleinikov S. N., Nasyrov R. R., Daminev R. R. *Novye tekhnologii i materialy v proizvodstve i stroitel'stve: voprosy proektirovaniya, razrabotki i vnedreniya* [New technologies and materials in production and construction: issues of design, development and implementation]. Moscow, Pero Publ., 2012, 148.
2. Bondarev A. B., Borkov P. V., Bondarev B. A., Zharikov V. A. [Repair and restoration of design elements of transport facilities using polymer composite materials]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 39(58), pp. 17—25.
3. Barenblatt G. I., Kozyrev Yu. I., Mashnin N. I. [About vibrocreep of polymeric materials]. *Prikladnaya matematika i tekhnicheskaya fizika* [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics], 1965, no. 5, pp. 68—75.
4. Ashkenazi E. K. *Anizotropiya mekhanicheskikh svoystv nekotorykh stekloplastikov* [Anisotropy of mechanical properties of some fiberglass]. Moscow, PMTF Publishing House, 1969. 210 p.
5. Prokof'ev A. S., Kabanov V. A., Smorchkov A. A. *Proektirovanie stroitel'nykh konstruksii s uchetom ustalosti* [Design of building constructions taking fatigue into account]. Tula, TPI Publishing House, 1988. 105 p.
6. Prokof'ev A. S. [Diagrams of wood fatigue failures]. *Oblegchennye konstruksii iz drevesiny, fanery i plastmass : tr. LISI* [Lightweight constructions made of wood, plywood and plastic. Proc. of LISI]. Leningrad, LISI Publ., 1984. Pp. 42—46.
7. Prokof'ev A. S. [Fatigue of wood]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Construction], 1985, no. 2, pp. 18—21.

8. Smorchkov A. A. *Vynoslivost' i vibropolzuchest' kleenykh derevyannykh balok : dis... kand. tekhn. nauk* [Durability and vibrocreep of laminated wooden beams. Cand. Eng. Sci. Dis.]. Moscow, 1982. 24 p.
9. Povetkin S. V. *Vynoslivost' derevyannykh kleevykh elementov pri izgibe : dis... kand. tekhn. nauk* [Durability of wooden glue elements under bending. Cand. Eng. Sci. Dis.]. Voronezh, 1988. 22 p.
10. Kabanov V. A. *Vliyanie temperaturno-vlazhnostnykh vozdeistvii na prochnost' i vynoslivost' kleenykh derevyannykh balok : dis... kand. tekhn. nauk* [Influence of temperature and moist effects on strength and durability of laminated wooden beams. Cand. Eng. Sci. Dis.]. Leningrad, 1983. 24 p.
11. Levchenko P. G. *Soprotivlyaemost' konstruksii iz furfurool-atsetonovogo stalepolimerbetona odnoznachnomu pul'siruyushchemu zagruzheniyu : dis... kand. tekhn. nauk* [Resistance of constructions made of furfurool-aceton steel polymer concrete to pulsating dipping. Cand. Eng. Sci. Dis.]. Voronezh, 1971. 20 c.
12. Bondarev B. A. *Soprotivlyaemost' polimerbetonnykh stroitel'nykh elementov, armirovannykh stekloplastikovoi armaturoi, tsiklicheskim nagruzkam: dis... kand. tekhn. nauk* [Resistance of polymer concrete construction elements, reinforced by fiberglass fittings, to cyclic loadings. Cand. Eng. Sci. Dis.]. Voronezh, 1990. 26 p.
13. Solomatov V. I., Bobryshev A. I., Khamler K. G. [Development of polystructural theory of composite construction materials]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Construction], 1985, no. 8, pp. 58—64.
14. Leont'ev N. L. *Tekhnika statisticheskikh vychislenii* [Technology of statistical calculations]. Moscow, Lesnaya Promyshlennost' Publ., 1966. 249 p.
15. Krasovskii G. I. *Planirovanie eksperimentov* [Planning of experiments]. Moscow, MSU Publ., 1982. 210 p.

*For citation:*

Bondarev A. B., Bondarev B. A., Borkov P. V., Saprykin R. Yu. [Study of vibrocreep polymer composite materials in the design of transport constructions at cyclic tests]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 35—43.

*About authors:*

**Bondarev Aleksandr Borisovich** — Candidate of Engineering Science, Director General, "LipetskNITsStroioproekt", ltd, [Talex\\_86@mail.ru](mailto:Talex_86@mail.ru)

**Bondarev Boris Aleksandrovich** — Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of Construction Materials and Structures Department, Lipetsk State Technical University. 30, Moskovskaya St., Lipetsk, 398600, Russian Federation, [LNSP-48@mail.ru](mailto:LNSP-48@mail.ru)

**Borkov Pavel Valer'evich** — Candidate of Engineering Science, Docent, Lipetsk State Technical University. 30, Moskovskaya St., Lipetsk, 398600, Russian Federation, [borkovpv@mail.ru](mailto:borkovpv@mail.ru)

**Saprykin Roman Yur'evich** — Postgraduate student of Building Materials and Road Technology Department, Lipetsk State Technical University. 30, Moskovskaya St., Lipetsk, 398600, Russian Federation, [ic-cup@bk.ru](mailto:ic-cup@bk.ru)

УДК 624.154.1

**Е. Н. Сычкина, А. Б. Пономарев**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ  
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ  
НА АРГИЛЛИТОПОДОБНЫХ ГЛИНАХ**

Приведена интерпретация данных статического зондирования для проектирования свайных фундаментов на аргиллитоподобных глинах. Проанализированы результаты расчета несущей способности одиночной сваи на аргиллитоподобных глинах согласно методикам: СП 24.13330.2011; Шмертманна и Ноттингема (Schmertmann and Nottingham); де Рейтера и Берингена (de Ruiter and Beringen); Голландским методом; методом Бустаманте и Джанзелли (Bustamante and Gianselli); LCPC-методом; методом Прайнса и Вардле (Prince and Wardle Method). Основное внимание уделено сопоставлению несущей способности свай по данным статического зондирования с расчетной несущей способностью и испытаниями натуральных и эталонных свай.

**Ключевые слова:** одиночная свая, несущая способность, аргиллитоподобная глина, статическое зондирование.

**Введение.** Необходимым условием сокращения расходов на возведение фундаментов глубокого заложения является максимальное использование несущей способности грунтов основания. Многочисленными исследованиями доказано, что разновозрастные грунты по-разному взаимодействуют с фундаментами зданий и сооружений. Это обусловлено особенностями микро-структуры самого грунта, сформированной в результате длительного взаимодействия разнообразных процессов: осадконакопления, уплотнения и разуплотнения, дегидратации, выветривания и др. Значительные территории нашей страны характеризуются распространением древних, нечетвертичных, отложений. Эти отложения могут быть представлены скальными грунтами – аргиллитами, песчаниками, алевролитами, известяками, мергелями, а также их разновидностями, выветрелыми до состояния глин, супесей, песков, щебня. В качестве примера можно привести вендские глины г. Санкт-Петербург [1], аргиллитоподобные глины пермского возраста в г. Перми [2], аргиллитоподобные глины позднепалеогенового возраста сочинской свиты [3], переуплотненные глины и песчаники Европы [4, 5], Северной Америки и Канады [6, 7], Японии [8]. Указанные древние отложения зачастую не имеют выхода на дневную поверхность, поскольку залегают под современными песчано-глинистыми отложениями. Однако ввиду низких значений показателей механических свойств последних, грунты нечетвертичного возраста все чаще используются в качестве оснований для свайных и свайно-плитных фундаментов высоконагруженных зданий и сооружений.

В настоящий момент полевые испытания методом статического зондирования получили широкое применение в свайном фундаментостроении благодаря своим преимуществам: экологичности, невысокой стоимости, скорости и возможности проведения испытаний в условиях плотной городской застройки на значительной глубине. Благодаря большому количеству

проведенных исследований достоверность расчетов свайных фундаментов по данным статического зондирования постоянно возрастает, однако ряд вопросов по определению несущей способности сваи и интерпретации данных статического зондирования в отложениях нечетвертичного возраста остается открытым.

В связи с актуальностью целью данной работы является анализ возможности применения данных статического зондирования для проектирования свайных фундаментов на аргиллитоподобных глинах. Для достижения поставленной цели в ходе исследования были решены следующие задачи:

1) выполнен анализ существующих направлений использования данных статического зондирования в свайном фундаментостроении, отечественных и зарубежных методик расчета несущей способности сваи;

2) дана характеристика экспериментальной площадки, описана методика статического зондирования и методика полевых исследований работы одиночной сваи;

3) результаты статического зондирования интерпретированы в соответствии с существующими картами-схемами;

4) результаты расчетов несущей способности наглядно представлены и сопоставлены с результатами полевых исследований;

5) на основании полученных результатов даны рекомендации по интерпретации данных статического зондирования в аргиллитоподобных глинах, а также прогнозу несущей способности сваи, опирающейся на аргиллитоподобные глины.

**Направления использования статического зондирования.** Накопленный к настоящему времени опыт в области статического зондирования позволяет разделить задачи, решаемые при помощи этого метода, на две группы: 1) инженерно-геологические задачи (определение литологического строения, физических и механических параметров грунтов); 2) задачи фундаментостроения (получение данных для проектирования фундаментов, определение несущей способности сваи). При решении инженерно-геологических задач статическое зондирование позволяет исследовать площадку по значительно более густой сетке точек. За рубежом для целей идентификации грунта по материалам статического зондирования широко используются карты-схемы, предложенные В. Дугласом и Р. Ольсеном [9], П. Робертсоном, Р. Кампанелла и другими [10]. Карты-схемы, как правило, не могут служить для точного определения типа грунта в каждой конкретной точке, но позволяют рассматривать общую зависимость параметров зондирования от состава и состояния грунтов и качественно оценивать связь состава и основных характеристик грунтов с параметрами зондирования. Подобные эмпирические обобщения допустимо делать только на основе большого количества исходных данных, рассматривая каждый тип геологических отложений, поскольку такие зависимости четко проявляются лишь в ограниченных диапазонах инженерно-геологических условий [11, 12].

Несмотря на то что сопротивление под нижним концом и на боковой поверхности зонда и сваи отличаются, статическое зондирование широко применяется для решения задач фундаментостроения, особенно при определении несущей способности сваи, что отражено в СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты». Большое количество проведенных исследований в этой области

позволило скорректировать представления о работе свай и зондов в различных грунтах и увеличить достоверность расчетов фундаментов, опирающихся на современные песчано-глинистые отложения, однако для грунтов нечетвертичного возраста ряд вопросов может оставаться открытым.

**Обзор отечественных методик расчета несущей способности свай по данным статического зондирования.** Расчет несущей способности свай по результатам статического зондирования в нашей стране был предложен в 60-е годы прошлого столетия и выполнялся согласно СНиП II-17—77. В дальнейшем была произведена корректировка переходных коэффициентов, и в настоящее время расчет несущей способности свай производится согласно положениям СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты» и сводится к определению сопротивления грунта по острию и боковой поверхности свай по формуле

$$F_u = R_s A + f h u,$$

где  $F_u$  — частное значение предельного сопротивления забивной свай;  $A$  — площадь острия свай;  $R_s$  — предельное сопротивление грунта под нижним концом свай по данным зондирования;  $h$  — глубина погружения свай от поверхности грунта около свай;  $u$  — периметр поперечного сечения ствола свай;  $f$  — среднее значение предельного сопротивления грунта на боковой поверхности свай по данным зондирования.

**Обзор зарубежных методик расчета несущей способности свай по данным статического зондирования.** Значительная часть зарубежных методик расчета несущей способности свай была разработана в 80-х и 90-х годах прошлого столетия [12]. Основное отличие зарубежных методик расчета от отечественных заключается в определении переходных коэффициентов от зонда к свае.

Во многих странах расчеты несущей способности свай выполняются по рекомендательным документам [13]. В общем случае расчет несущей способности свай, аналогично отечественным нормам, заключается в определении сопротивления грунта по острию и боковой поверхности свай по формуле

$$Q_{ult} = r_t A_t + r_s A_s,$$

где  $Q_{ult}$  — предельная несущая способность свай, соответствующая предельному сопротивлению свай  $F_u$ ;  $A_t$  — площадь острия свай;  $A_s$  — площадь боковой поверхности свай;  $r_t$  — сопротивление грунта под острием свай;  $r_s$  — сопротивление грунта по боковой поверхности свай.

Среди наиболее распространенных методов расчета можно отметить:

- 1) метод Шмертманна и Ноттингема (Schmertmann and Nottingham);
- 2) метод де Рейтера и Берингена (de Ruyter and Beringen), Голландский метод или Европейский метод;
- 3) метод Бустаманте и Джанзелли (Bustamante and Gianelli), LCPC-метод или Французский метод;
- 4) метод Прайнса и Вардле (Prince and Wardle Method).

Основное отличие приведенных выше методик заключается в определении сопротивлений грунта под острием  $r_t$  и по боковой поверхности свай  $r_s$ .

### **Метод Шмертманна и Ноттингема (Schmertmann and Nottingham).**

Данный метод разработан на основе сопоставления модельных и натуральных испытаний свай, проведенных Ноттингемом в 1975 г. и Шмертманном в 1978 г. [13, 14]. Сопротивление грунта под нижним концом сваи определяется по формуле

$$r_i = Cq_{ca} \text{ (не более 15 МПа),}$$

где  $C$  — корреляционный коэффициент, зависящий от коэффициента переуплотнения грунта  $OCR$ , в данной работе принят равным 0,5;  $q_{ca}$  — усредненное значение удельного сопротивления грунта в зоне влияния.

Определение  $q_{ca}$  происходит в следующей последовательности:

1. Определяется минимальное из средних значений удельного сопротивления грунта по конусу зонда,  $q_c$ , в зоне ниже острия сваи на  $0,7D$  и  $4D$  ( $D$  — сторона сваи).

2. Определяется среднее значение  $q_c$  в зоне выше острия сваи на  $8D$  по огибающей линии, которая проходит через минимальные значения  $q_c$ .

3. Определяется среднее значение  $q_c$ , полученное в шаге 1 и 2, которое и принимается за  $q_{ca}$ .

Сопротивление по боковой поверхности сваи определяется по формуле

$$r_s = Kf_s \text{ (не более 120 кПа),}$$

где  $f_s$  — удельное сопротивление грунта по муфте трения зонда, определяется аналогично  $q_{ca}$ ;  $K$  — безразмерный переходный коэффициент, определяемый графическим методом [13, 14], в данной работе принят равным 0,4.

**Метод де Рейтера и Берингена (deRuiter and Beringen)**, известный также как Европейский метод или Голландский метод [13]. Сопротивление грунта под нижним концом сваи определяется по формуле

$$r_i = 9S_u, \tag{1}$$

где  $S_u$  — удельное сопротивление недренированному срезу, определяется по формуле

$$S_u = \frac{q_{ca}}{N_k},$$

где  $N_k$  — фактор конуса, который зависит от местных условий и в данной работе принят равным 20;  $q_{ca}$  — усредненное значение удельного сопротивления грунта, определяется согласно методу Шмертманна и Ноттингема [14].

Сопротивление грунта по боковой поверхности сваи для глин определяется по формуле

$$r_s = aS_u,$$

где  $a$  — коэффициент, принимаемый для переуплотненных глин равным 0,5;  $S_u$  — тоже, что и в формуле (1), только рассчитанное для каждого слоя, прорезаемого свайей.

**Метод Бустаманте и Джанзелли (Bustamante and Gianselli)**, Известный также как LCPC-метод или Французкий метод, предложенный

в 1982 г. [15]. Сопротивление грунта под нижним концом сваи определяется по формуле

$$r_i = k_b q_{eq},$$

где  $k_b$  — эмпирический коэффициент несущей способности, зависящий от типа грунта и метода устройства сваи;  $q_{eq}$  — усредненное значение удельного сопротивления грунта по конусу.

Сопротивление грунта по боковой поверхности сваи рассчитывается по формуле

$$r_s = \frac{q_c}{k_c},$$

где  $q_c$  — удельное сопротивление грунта по муфте трения зонда;  $k_c$  — безразмерный переходный коэффициент, зависящий от типа грунта, типа сваи и метода устройства свай.

Усредненное значение удельного сопротивления грунта по конусу  $q_{eq}$  определяется следующим образом:

1) определяется среднее значение удельного сопротивления грунта по конусу,  $q_{ca}$ , на участке от  $1,5D$  выше острия сваи и до  $1,5D$  ниже острия сваи ( $D$  — диаметр или сторона сваи);

2) отбрасываются значения удельного сопротивления грунта по конусу,  $q_c$ , находящиеся вне интервала  $0,7q_{ca} < q_c < 1,3q_{ca}$ ;

3) определяется среднее значение удельного сопротивления грунта по конусу  $q_{eq}$  для усеченной в шаге второй части.

**Метод Прайнса и Уардле (Prince and Wardle Method).** Сопротивление грунта под нижним концом сваи, согласно методу Прайнса и Уардле [16], определяется по формуле

$$r_i = k_b q_{ca},$$

где  $k_b$  — коэффициент, принимаемый равным 0,35 для забивной сваи;  $q_{ca}$  — среднее значение удельного сопротивления грунта по конусу на участке  $4D$  ниже и  $8D$  выше острия сваи.

Сопротивление грунта по боковой поверхности сваи рассчитывается по формуле

$$r_s = k_s f_s,$$

где  $k_s$  — коэффициент, принимаемый для забивной сваи равным 0,53;  $f_s$  — удельное сопротивление грунта по муфте трения зонда.

**Методика экспериментального исследования.** В исследовании основное внимание уделено вышеперечисленным методам расчета несущей способности сваи. По результатам статического зондирования расчет несущей способности был выполнен согласно методике: СП 24.13330.2011; Шмертманна и Ноттингема (Schmertmann and Nottingham); де Рейтера и Берингена (deRuiter and Beringen) Голландским методом; методом Бустаманте и Джанзелли (Bustamante and Gianselli); ЛСРС-методом; методом Прайнса и Вардле (Prince and Wardle Method). Полученные по данным статического зондирова-

ния значения несущей способности свай были сопоставлены с расчетной несущей способностью согласно п. 7.2. СП 24.13330.2011 и испытаниями статической нагрузкой натуральных и эталонных свай.

Для исследований была выбрана одна из строительных площадок г. Перми, где выполнялось статическое зондирование зондом II типа, а также натурные испытания свай статической вдавливающей нагрузкой, испытания эталонной сваей. Несущим слоем для свайного фундамента являлась аргиллитоподобная глина раннепермского возраста.

Геологическое строение площадки представлено следующими инженерно-геологическими элементами (ИГЭ):

ИГЭ 1. Суглинок от тугопластичного до полутвердого ( $alQ_{IV}$ ).

ИГЭ 2. Суглинок твердый, просадочный ( $alQ_{IV}$ ).

ИГЭ 3. Песок мелкий, средней плотности, с гравием и галькой до 15 % ( $alQ_{IV}$ ).

ИГЭ 4. Песок средней крупности, средней плотности, с гравием и галькой до 15 % ( $alQ_{IV}$ ).

ИГЭ 5. Аргиллитоподобная глина, от твердой до тугопластичной ( $P_1Sh$ ).

Гидрогеологические условия площадки характеризуются развитием трещинно-грунтовых вод. Установившийся уровень зафиксирован на глубине 16,4...23,3 м (отметки в Балтийской системе высот).

Статическое зондирование выполнялось в соответствии с ГОСТ 19912—2012 установкой С-832 с механической системой задавливания зонда. Зондирование выполнено в восьми точках. Тип применяемого зонда — II. Параметры зонда следующие: диаметр основания конуса — 35,7 мм; угол при вершине конуса — 60°; площадь конуса — 10 см<sup>2</sup>; наружный диаметр муфты — 35,7 мм; длина муфты — 150 мм; площадь муфты — 150 см<sup>2</sup>; наружный диаметр штанг — 36 мм; длина штанги — 1 м.

Полевые работы по испытаниям натуральных свай статической нагрузкой были выполнены на экспериментальной площадке в соответствии с ГОСТ 5686—2012 «Грунты. Методы полевых испытаний сваями». На экспериментальной площадке были испытаны четыре натурные сваи: свая № 407 длиной 8 м; свая № 592 длиной 10 м; свая № 403 длиной 10 м; свая № 587 длиной 5 м. Все сваи забивные, сечением 30 × 30 см, из бетона В25. Грунт под острием свай — аргиллитоподобная глина.

Кроме натуральных свай на площадке были испытаны три эталонные сваи № 1, 2, 3, опирающиеся на аргиллитоподобные глины. Все эталонные сваи имели диаметр 114 мм и наконечник-конус с углом при вершине 60° и забивались с забоя лидирующей скважины глубиной 1,0 м. Испытания были выполнены в соответствии с ГОСТ 5686—2012 «Грунты. Методы полевых испытаний сваями».

**Полученные результаты.** Пермские аргиллитоподобные глины можно идентифицировать по повышенным значениям лобового сопротивления  $q_s$  (в исследовании изменяется в пределах 1,1 МПа до 14,6 МПа) и бокового сопротивления  $f_s$  (изменяется в пределах от 0,07 МПа до 0,8 МПа). Полученные зависимости между значениями сопротивления аргиллитоподобной глины под нижним концом и на боковой поверхности зонда графически отображены на карте-схеме В. Дугласа, П. Ольсена [9] (рис. 1).

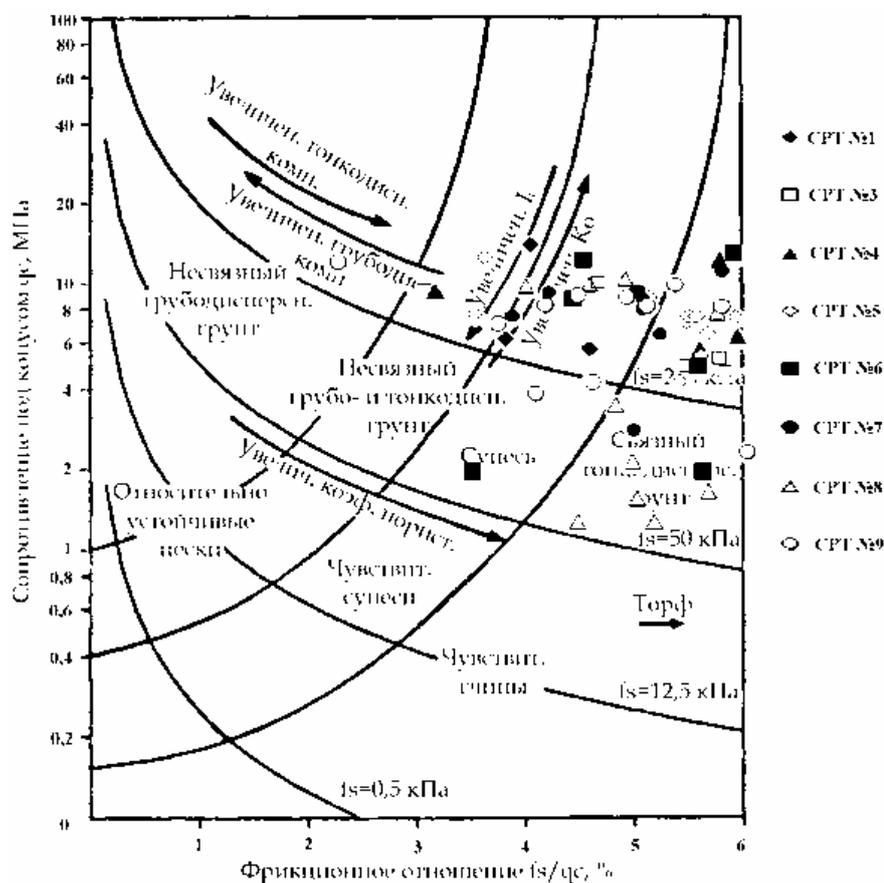


Рис. 1. Карта-схема В. Дугласа и Р. Ольсена с данными статического зондирования пермских аргиллитоподобных глин

На рис. 1 видно, что пермские аргиллитоподобные глины могут быть идентифицированы как тонкодисперсные грунты, с повышенными значениями коэффициента бокового давления  $K_0$  (переуплотненные), низкими значениями показателя текучести (твердая консистенция), реже супесей. Однако карта-схема на рис. 1 позволяет анализировать значения фрикционного отношения в достаточно небольшом диапазоне (1...6 %), тогда как для аргиллитоподобной глины подобное соотношение в данном исследовании изменялось в пределах 2...15 %.

На рис. 2 показаны зависимости между значениями сопротивления аргиллитоподобной глины под нижним концом и на боковой поверхности зонда, на основе карты-схемы, предложенной П. Робертсоном [10].

На рис. 2 видно, что пермские аргиллитоподобные глины попадают главным образом в зону очень плотных тонкодисперсных грунтов с повышенными значениями коэффициента переуплотнения OCR, глин, реже — супесей от пылеватых до опесчаненных и песков пылеватых. Таким образом, данная карта-схема также может быть использована для идентификации аргиллитоподобной глины, но уже в большем интервале определенного фрикционного соотношения (1...8 %).

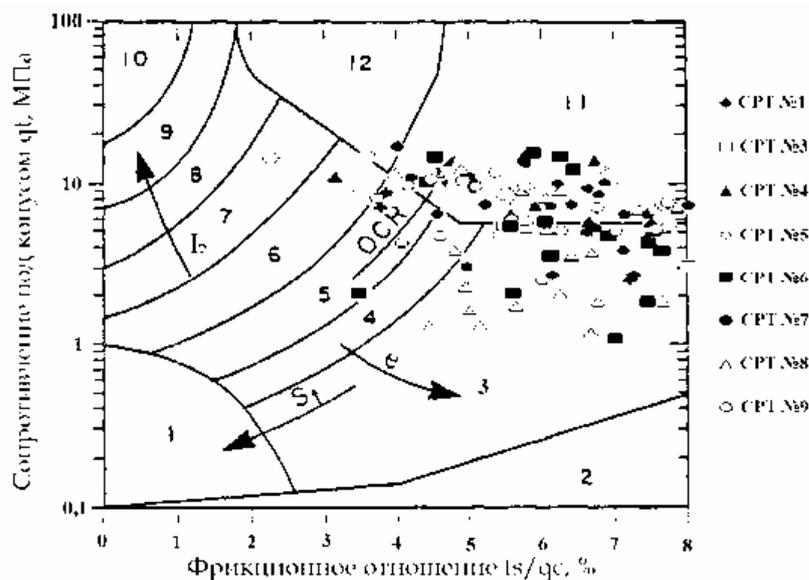


Рис. 2. Карта-схема П. Робертсона с данными статического зондирования пермских аргиллитоподобных глин: 1 — чувствительные тонкодисперсные; 2 — заторфованные; 3 — глины; 4 — пылеватые глинистые; 5 — то же с большей долей пылеватых частиц; 6 — пылеватые и опесчаненные супеси; 7 — пылеватые пески и опесчаненные супеси; 8 — пески, в том числе с примесью пылеватых частиц; 9 — пески; 10 — гравелистые и крупнозернистые пески; 11 — очень плотные тонкодисперсные; 12 — пески цементированные или переуплотненные

Значения несущей способности свай, рассчитанные в точках статического зондирования различными методами, представлены в табл.

*Несущая способность свай, определенная в точках статического зондирования*

Номер точки статического зондирования	Несущая способность свай, кН				
	Метод СП 24.13330.2011	Метод Шмертмана и Ноттингема	Метод Рейтера и Берингена	Метод Бустаманте и Джанзелли	Метод Прайнса и Уардле
СРТ № 1	1655,2	806,8	613,4	907,0	1459,2
СРТ № 3	1688,2	1188,9	1077,2	1515,8	1560,4
СРТ № 4	1427,2	1051,9	588,7	1076,0	1385,3
СРТ № 5	1470,3	1545,8	1240,9	2381,1	1789,4
СРТ № 6	1793,3	1640,9	1265,4	1819,1	1858,5
СРТ № 7	2124,2	2275,0	1559,7	2823,9	2616,4
СРТ № 8	1592,2	1659,2	1563,3	2124,1	1393,5
СРТ № 9	1868,7	1597,7	1582,4	2207,7	1743,1

Для оценки результатов, полученных расчетным путем согласно п. 7.2. СП 24.13330.2011., было выполнено их сравнение с результатами испытаний натуральных и эталонных свай, выполненных на изучаемой площадке (рис. 3).

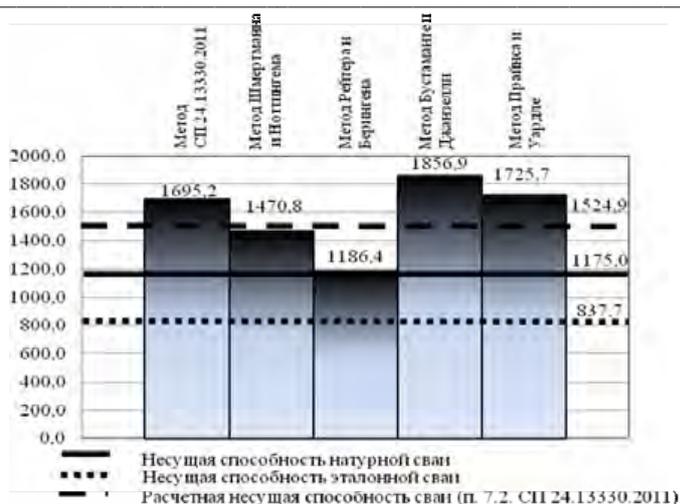


Рис. 3. Средние значения расчетной и экспериментальной несущей способности свай, опирающихся на аргиллитоподобные глины

На рис. 3 видно, что наиболее близкие значения несущей способности свай к натурным испытаниям статической нагрузкой показали результаты расчета методом Рейтера и Берингена (разница составила менее 1 %), методом Шмертманна и Ноттингема (разница составила 25,2 %), расчетная несущая способность по методу СП 24.13330.2011 (разница составила около 30 %). Результаты испытаний эталонной сваи на основаниях, представленных аргиллитоподобными глинами, оказались заниженными по отношению к несущей способности натурной сваи на 28,7 %. Остальные методы показали завышенные на 44,3...58 % значения несущей способности сваи.

Следует также подчеркнуть, что статические испытания натуральных свай № 403, 407, 587, 592 проводились до достижения величины проектной нагрузки на сваю. В результате выполненных испытаний свай график «осадка — нагрузка» имел линейный характер, таким образом, несущая способность натуральных свай не была полностью исчерпана. Если говорить о графиках «осадка — нагрузка» эталонных свай, то последние имели выраженный нелинейный характер (рис. 4).

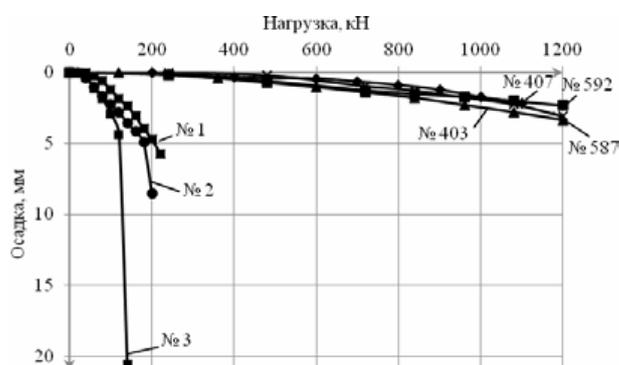


Рис. 4. График «осадка — нагрузка» натуральных и эталонных свай

На рис. 4 видно, что графики осадки натуральных свай № 403, 407, 587, 592 имели практически линейный характер и при нагрузке 1100 кН значения осадки изменялись в пределах от 2,1 до 2,9 мм. Вместе с тем, осадки эталонных свай № 1, 2, 3 резко возрастали уже при нагрузке 60 кН и по результатам испытания составили от 5,7 до 20,6 мм, что говорит о полном исчерпании несущей способности эталонных свай.

Таким образом, среди наиболее достоверных методов прогноза несущей способности свай на пермских аргиллитоподобных глинах можно отметить полевые испытания статическим зондированием, обработанные методом Рейтера и Берингена, Шмертманна и Ноттингема, испытания эталонных свай, расчетный метод СП 24.13330.2011 (п. 7.2.). Полученные результаты при соответствующем обосновании могут использоваться для прогноза несущей способности свай на основаниях, представленных подобными отложениями, а также в схожих геологических условиях строительства. Дальнейшие исследования в указанной области являются перспективным для изучения, учитывая широкое распространение грунтов нечетвертичного возраста и их использование в качестве оснований фундаментов зданий и сооружений во многих странах мира.

#### **Выводы:**

1. По материалам статического зондирования можно идентифицировать аргиллитоподобные глины в разрезе, используя существующие карты-схемы В. Дугласа, Р. Ольсена и П. Робертсона. Изучаемые грунты попадают в область на границе между дисперсными и переуплотненными грунтами, и могут быть классифицированы как глины и реже супеси.

2. Наиболее близкие значения несущей способности свай к натурным испытаниям статической нагрузкой показали результаты расчета методом Рейтера и Берингена (разница составила менее 1 %), методом Шмертманна и Ноттингема (разница составила 25,2 %), расчетным способом, согласно п. 7.2 СП 24.13330.2011 (разница составила около 30 %). Результаты испытаний эталонной сваи на основаниях, представленных аргиллитоподобными глинами, оказались заниженными по отношению к несущей способности натурной сваи на 28,7 %. Расчет по данным статического зондирования по методу СП 24.13330.2011, методу Прайнса и Уардле, методу Бустаманте и Джанзелли показали завышенные на 44,3...58 % значения несущей способности свай.

3. Среди наиболее достоверных методов прогноза несущей способности свай на пермских аргиллитоподобных глинах можно отметить полевые испытания статическим зондированием, обработанные методом Рейтера и Берингена, Шмертманна и Ноттингема, испытания эталонных свай, расчетный метод СП 24.13330.2011 (п. 7.2). Полученные результаты при соответствующем обосновании могут использоваться для прогноза несущей способности свай на основаниях, представленных подобными отложениями. По мнению авторов, данное направление исследований является перспективным для дальнейшего изучения, учитывая широкое распространение грунтов нечетвертичного возраста и их использование в качестве оснований фундаментов зданий и сооружений во многих странах мира.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование инженерно-геологических условий основания общественно-делового центра «ОХТА» в Санкт-Петербурге / О. К. Воронков, Н. Ф. Кривоногова, Л. Ф. Ушакова, В. Н. Афанасьев, И. В. Лаков // Известия ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева. 2009. Т. 257. С. 64—77.
2. *Ponomaryov A., Sychkina E.* Analysis of strain anisotropy and hydrosopic property of clay and claystone // *Applied Clay Science*. 2015. Vol. 114. P. 61—169.
3. *Хмелевцов А. А.* Аргиллитоподобные глины в районе Большого Сочи и их физико-механические характеристики // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2011. № 6. С. 77—79.
4. *Bond A. J., Jardine R. J.* Effects of installing displacement piles in high OCR clay // *Geotechnique*. 1991. № 41(3). P. 341—363. DOI: 10.1680/geot.1991.41.3.341
5. *Cooke R. W., Price G., Tarr K.* Jacked piles in London Clay: a study of load transfer and settlement under working conditions // *Geotechnique*. 1979. № 29(2). P. 113—147. DOI: 10.1680/geot.1979.29.2.113
6. *J. de Kuitert, F. L. Beringen.* Pile foundations for large north sea structures // *Marine Geotechnology*. 1979. № 3(3). P. 267—314. DOI: 10.1080/10641197909379805.
7. *Lehane B. M., Jardine R. J.* Displacement pile behaviour in glacial clay // *Canadian Geotechnical Journal*. 1994. № 31(1). P. 79—90. DOI: 10.1139/t94-009.
8. *Matsumoto T., Michi Y., Hirano T.* Performance of Axially loaded steel pipe piles driven in soft rock // *Journal of geotechnical engineering*. 1995. 121 (4). P. 305—315. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121:4(305).
9. *Douglas B. J., Olsen R. S.* Soil classification using electric cone penetrometer // *Cone penetration Testing and Experience*. Proc. of the ASCE National convention, St. Louis: ASCE, 1981. P. 209—227.
10. Use of piezometer cone data / P. K. Robertson, R. G. Campanella, D. Gillespie, J. Greig // Proc. of the ASCE Specialty Conf. In Situ'86: Use of In Situ Test in Geotechnical Engineering. Blackburg: ASCE, 1986. P. 1263—1280.
11. Анализ результатов экспериментальных исследований механических свойств аргиллитов / А. Б. Пономарев, Е. Н. Сычкина, М. А. Акбуляков, А. Ю. Черепанов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 30 (49). С. 108—120.
12. *Рыжков И. Б., Исаев О. Н.* Статическое зондирование грунтов. М.: АСВ, 2010. 496 с.
13. *Fellenius H.* Basics of Foundation Design // Revised Electronic Edition. Sidney, Canada. 2014. 413 p.
14. *Schmertmann J. H.* Guidelines for Cone Penetration Test, Performance and Design // U.S. Department of Transportation, Report No. FHWA-TS-78-209, Washington, D.C. 1978. P. 145.
15. *Bustamante M., Gianeeselli L.* Pile Bearing Capacity Predictions by Means of Static Penetrometer CPT // *Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, ESOPT-II*, Amsterdam. 1982. Vol. 2. P. 493—500.
16. *Price G., Wardle I. F.* A Comparison Between Cone Penetration Test Results and the Performance of Small Diameter Instrumented Piles in Stiff Clay // Proc. of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam. 1982. Vol. 2. Pp. 775—780.

© Сычкина Е. Н., Пономарев А. Б., 2016

Поступила в редакцию  
в феврале 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Сычкина Е. Н., Пономарев А. Б. Перспективы использования данных статического зондирования при проектировании свайных фундаментов на аргиллитоподобных глинах // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 44—56.

Об авторах:

**Сычкина Евгения Николаевна** — ассистент кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, [aspirant123@maik.ru](mailto:aspirant123@maik.ru)

**Пономарев Андрей Будимирович** — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29

**E. N. Sychkina, A. B. Ponomarev**

## PERSPECTIVES OF USING CONE PENETRATION TEST DATA AT PILE FOUNDATIONS DESIGNING ON CLAYSTONES

The article is devoted to the interpretation of cone penetration test data at pile foundations designing on claystones. The authors analyze the results of the calculation of the bearing capacity of single pile on claystones according to the methodology: SP 24.13330.2011; Schmertmann and Nottingham; de Ruiter and Beringen; Dutch method; Bustamante and Gianselli; LCPC method; method Prince and Wardle Method. Much attention is given to comparing the bearing capacity of piles according to the cone penetration test data with the bearing capacity and full-scale pile and steel pipe piles tests.

**Key words:** single pile, bearing capacity, claystone, cone penetration test.

### REFERENCES

1. Voronkov O. K., Krivonogova N. F., Ushakova L. F., Afanas'ev V. N., Lakov I. V. [Research of engineering and geological conditions of the foundation of cultural and business complex "Ohota" in Saint Petersburg]. *Izvestiya VNIIG imeni B. E. Vedeneeva* [News of VNIIG named after B. E. Vedeneev]. 2009. Vol. 257. Pp. 64—77.
2. Ponomaryov A., Sychkina E. Analysis of strain anisotropy and hydroscopic property of clay and claystone. *Applied Clay Science*, 2015, vol. 114, pp. 61—169.
3. Khmelevtsov A. A. [Claystone-like clays in the area of Bol'shoi Sochi and their physical and mechanical properties]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Estestvennyye nauki* [University news North-Caucasian Region. Natural Sciences Series], 2011, no. 6, pp. 77—79.
4. Bond A. J., Jardine R. J. Effects of installing displacement piles in high OCR clay. *Geotechnique*, 1991, 41(3), pp. 341—363. DOI: 10.1680/geot.1991.41.3.341
5. Cooke R. W., Price G., Tarr K. Jacked piles in London Clay: a study of load transfer and settlement under working conditions. *Geotechnique*, 1979, 29(2), pp. 113—147. DOI: 10.1680/geot.1979.29.2.113
6. J. de Kuiter, F. L. Beringen, Pile foundations for large north sea structures. *Marine Geotechnology*, 1979, 3(3), pp. 267—314. DOI: 10.1080/10641197909379805.
7. Lehane B. M., Jardine R. J. Displacement pile behaviour in glacial clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(1), pp. 79—90. DOI: 10.1139/t94-009.
8. Matsumoto T., Michi Y., Hirano T. Performance of Axially loaded steel pipe piles driven in soft rock. *Journal of geotechnical engineering*, 1995, 121 (4), pp. 305—315. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121:4(305).
9. Douglas B. J., Olsen R. S. Soil classification using electric cone penetrometer. *Cone penetration Testing and Experience. Proc. of the ASCE National convention*, St. Louis: ASCE, 1981. Pp. 209—227.
10. Robertson P. K., Campanella R. G., Gillespie D., Greig J. Use of piezometer cone data. *Proc. of the ASCE Specialty Conf. In Situ'86: Use of In Situ Test in Geotechnical Engineering*. Blackburg: ASCE, 1986, pp. 1263—1280.
11. Ponomarev A. B., Sychkina E. N., Akbul'yakov M. A., Cherepanov A. Yu. [The analysis of the results of pilot research of soapstone mechanical properties]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2013, iss. 30(49), pp. 108—120.
12. Ryzhkov I. B., Isaev O. N. *Stitcheskoe zondirovanie gruntov* [Cone penetration testing]. Moscow, ASV Publ., 2010. 496 p.
13. Fellenius H. Basics of Foundation Design. *Revised Electronic Edition*. Sidney, Canada. 2014. 413 p.

14. Schmertmann J. H. Guidelines for Cone Penetration Test, Performance and Design. *U.S. Department of Transportation, Report No. FHWA-TS-78-209*, Washington, D.C. 1978. P. 145.

15. Bustamante M., Gianeeselli L. Pile Bearing Capacity Predictions by Means of Static Penetrometer CPT. *Proc. of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, ESOPT-II*, Amsterdam. 1982. Vol. 2. Pp. 493—500.

16. Price G., Wardle I. F. A Comparison Between Cone Penetration Test Results and the Performance of Small Diameter Instrumented Piles in Stiff Clay. *Proc. of the 2nd European Symposium on Penetration Testing*, Amsterdam. 1982. Vol. 2. Pp. 775—780.

*For citation:*

Sychkina E. N., Ponomarev A. B. [Perspectives of using cone penetration test data at pile foundations designing on claystones]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 44—56.

*About authors:*

**Sychkina Evgeniya Nikolaevna** — Assistant of Construction Operations and Geotechnics Department, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolskii Prospect, Perm', 614990, Russian Federation, [aspirant123@maik.ru](mailto:aspirant123@maik.ru)

**Ponomarev Andrei Budimirovich** — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Construction Operations and Geotechnics Department, Perm National Research Polytechnic University. 29, Komsomolskii Prospect, Perm', 614990, Russian Federation

УДК 691.327.666

**А. С. Голованова<sup>а</sup>, Т. К. Акчурин<sup>а</sup>, О. Ю. Пушкарская<sup>б</sup>**

<sup>а</sup> *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

<sup>б</sup> *Волжский институт строительства и технологий (ВИСТех) — филиал ВолгГАСУ*

### **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ АГРЕССИВНЫХ СРЕД**

Строительные конструкции в силу своей структуры практически всегда проницаемы для жидкостей и газов, неустойчивы к многим химически агрессивным средам. Полимерные материалы используются в качестве защитных покрытий для устранения вышеперечисленных недостатков на поверхности бетона. Химическая стойкость полимерной композиции является определяющей при выборе компонентов полимерных покрытий для защиты изделий и конструкций от воздействия различных агрессивных факторов. Разработанный полимерный состав холодного отверждения представляет собой тонкодисперсный порошкообразный материал, который в смеси с растворителем, вводимым непосредственно перед нанесением, обладает пропиточными свойствами, что приводит к повышению коррозионной стойкости, снижению водопоглощения, росту прочности бетонной конструкции. Эффект самозалечивания обеспечивается путем заполнения и блокирования пор и трещин в поверхностном слое образца. Снижение коэффициента химической стойкости в растворе соляной кислоты составило 13 %, в растворе аммиака химическая стойкость покрытия снизилась на 17 %, в растворе едкого натрия процент снижения химической стойкости равен пяти. Теоретическое обоснование вопросов повышения химической стойкости композиционных материалов на основе полимерных отходов и их экспериментальное подтверждение обуславливает актуальность поставленных цели и задач исследовательской работы.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** полимерные отходы, эпоксидная композиция, коррозионная стойкость.

Бетонные и железобетонные строительные конструкции в силу своей структуры практически всегда проницаемы для жидкостей и газов, которые находятся под давлением. Они также нестойки против многих химически агрессивных сред, обладают достаточно высоким водопоглощением, плохими диэлектрическими свойствами, при этом их поверхность имеет шероховатую структуру. Защитные полимерные покрытия используют для устранения вышеперечисленных недостатков на поверхности бетона, создавая при этом композицию с улучшенными свойствами, более стойкими по отношению к влаге и агрессивным средам. Полимерное покрытие должно обладать определенными свойствами: высоким сцеплением с поверхностью бетона, высокой прочностью, эластичностью и трещиностойкостью, низкой проницаемостью для агрессивных сред, долговечностью и экономичностью. В наибольшей степени вышеперечисленным требованиям удовлетворяют покрытия на полимерной основе: лакокрасочные, мастичные, полимерцементные, пленочно-плиточные, листовые. В России и за рубежом наиболее широко используют эпоксидные составы для защиты строительных конструкций, мостовых, аэродромных покрытий, повышая их износостойкость. Химическая стойкость полимерной композиции, ее термостабильность, природа защищаемой поверхности, сцепляемость покрытия с защищаемой поверхностью и другие свойства полимерной композиции являются определяющими при выборе компонентов полимерных покрытий для защиты изделий и конструкций от

воздействия различных агрессивных факторов. Как правило, химическая стойкость является одним из определяющих свойств, а при оценке эффективности применения этих материалов, необходимо учитывать химическую стойкость полимерных композиций. Диаграмма, представленная на рис. 1, дает общее представление при ориентировочном выборе вида или группы полимеров для использования в тех или иных строительных изделиях и конструкциях. Расшифровка принятых сокращений на диаграмме: НК — натуральный каучук; СКИ — каучук синтетический изопреновый; СКД — каучук бутадиеновый; СКС — каучук бутадиенстирольный; СКЭП — каучук этиленпропиленовый; СКФ — каучук фторосодержащий; БК — бутилкаучук; ХСПЭ — хлорсульфированный полиэтилен. Фенолоформальдегидные и эпоксифенольные полимеры (рис. 1), относящиеся к типу терморезистивных смол, могут быть использованы практически для всех видов защиты, приведенных на диаграмме.

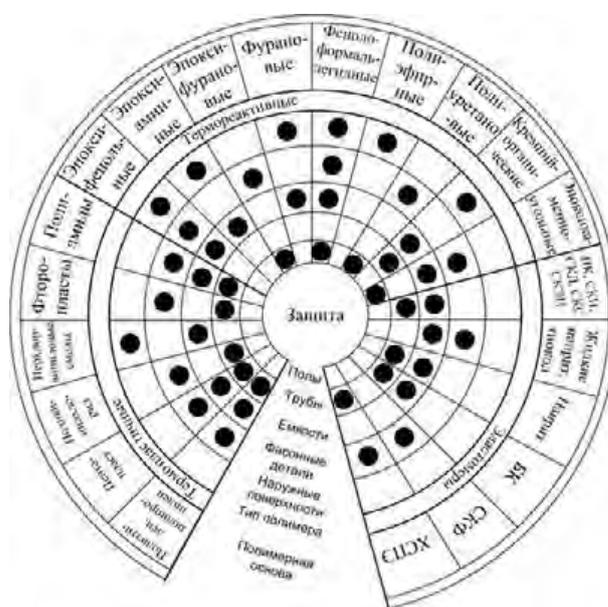


Рис. 1. Диаграмма ориентировочного выбора полимеров для использования в строительных изделиях и конструкциях

Модификация строительных материалов путем нанесения полимерных композиций на поверхность, введением полимеров в бетонную или растворную смесь при перемешивании, пропитка полимерами готовых изделий является основным приемом повышения прочности при всех видах механического нагружения, улучшением деформативных характеристик, повышением химической стойкости, водостойкости и водонепроницаемости, уменьшением истираемости, повышением способности сцепляться с другим материалом.

Композиции на основе эпоксидной смолы при ее модификации производными фенола, которые являются антиоксидантами и защищают полимеры от окислительной деструкции, наиболее востребованы в качестве полимерных покрытий бетонных поверхностей. Но дефицит и дороговизна исходных материалов для эпоксидных модифицированных композиций является серь-

езным сдерживающим фактором, который может быть минимизирован путем использования техногенных отходов полимерного и минерального состава.

Исследование возможности применения полимерных отходов при их модификации производными фенола, наполнении минеральными и органическими материалами техногенной природы имеют научно-практический интерес и экономическую целесообразность. Порошкообразный полимерный материал, состоящий практически на 99,5 % из эпоксидной смолы, в сочетании с фенольным модификатором и наполнителями представляет собой многокомпонентную полимерную систему холодного отверждения (МПСХО). По структуре разработанный состав — это тонкодисперсный порошкообразный материал, а в смеси с растворителем, вводимым непосредственно перед нанесением МПСХО, он обладает пропиточными свойствами, что значительно позволяет снизить дефектность цементного камня, приводит к повышению коррозионной стойкости, снижению водопоглощения, росту прочности бетонной конструкции [1—5].

Структура пленкообразования при нанесении МПСХО на поверхность бетона (рис. 2) обеспечивает эффект самозалечивания путем заполнения и блокирования пор и трещин в поверхностном слое образца, что обуславливает снижение водопоглощения и высокие гидроизоляционные свойства состава МПСХО [4]. Исследования структуры поверхности проводились методами оптической микроскопии (МБС-9, 10).

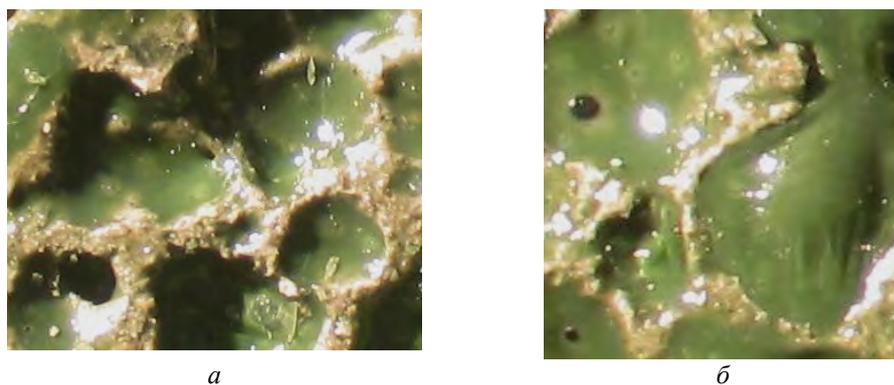


Рис. 2. Микроскопическое изображение бетонной поверхности, обработанной полимерной композицией МПСХО: *а* — однослойное покрытие; *б* — двухслойное покрытие

Эффект пленкообразования обеспечивается за счет ряда строго последовательных химических реакций между компонентами МПСХО, продолжающимися во времени, а также процессами смачивания и адгезии, проходящими внутри структуры защищаемого материала, в результате чего заполняются капилляры, поры и микротрещины поверхности (рис. 2).

Реакции отверждения, протекающие в МПСХО, являются одним из видов реакций сшивания за счет содержания в линейных полимерах эпоксидной смолы и фенолоформальдегидной смолы, которые содержат реакционно-способные функциональные группы, двойные связи. При взаимодействии с низко- или высокомолекулярными соединениями (гексаметилентетрамин), содержащими определенные функциональные группы, способные реагиро-

вать с функциональными группами компонентов композиции (форполимер), происходит отверждение, приводящее к образованию сшитой твердой полимерной массы. Для осуществления сшивания необходимо, чтобы функциональность отвердителя была как минимум равна двум, а форполимер или отверждающий агент (или и тот, и другой) содержали некоторое количество трифункциональных молекул. Трифункциональные молекулы обеспечивают образование сетки. Степень сшивания определяется соотношением би- и трифункциональных молекул в системе (рис. 3—6).

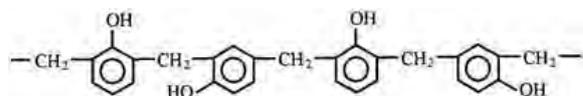


Рис. 3. Структура формальдегидных смол

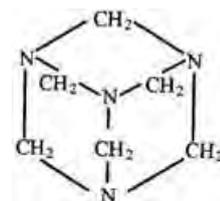


Рис. 4. Структура гексаметилентетрамина

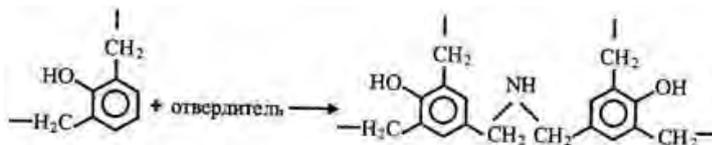


Рис. 5. Сшивание формальдегидных смол гексаметилентетрамином (уротропином)

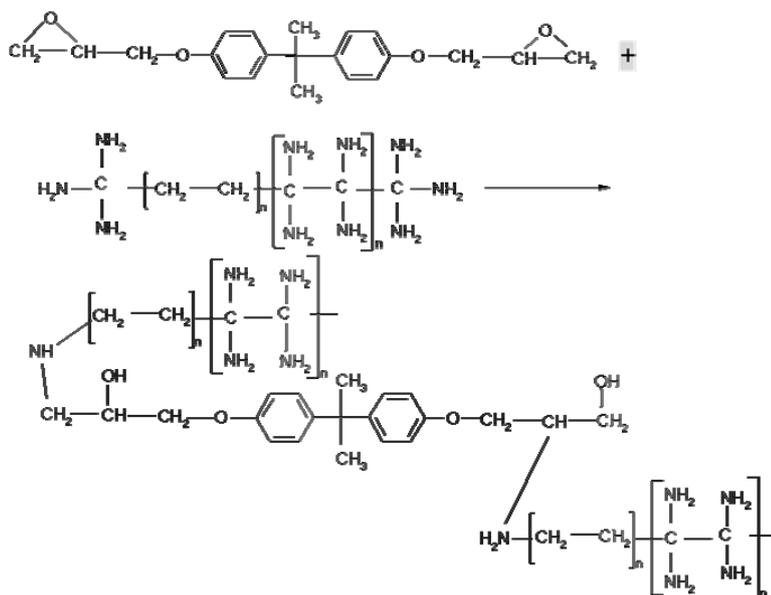


Рис. 6. Реакция отверждения эпоксидной смолы

Выбор отвердителя для полимерной композиции МПСХО очень важен. Соотношение атомов кислорода и водорода с учетом различных молекулярных масс и плотностей влияет на соотношение смолы и отвердителя в компо-

зиции. Несоблюдение соотношений в конечном итоге приведет к снижению прочности отвержденной смолы из-за неполного образования пространственных связей. Особенностью состава разработанной композиции является то, что все составляющие ее компоненты — отходы производства. В частности, модификатор фенолоформальдегидной смолы (тип наволака) используется в абразивной промышленности в качестве связующего, содержащего в своем составе отвердитель уротропин. Невостребованный материал с истекшим сроком годности не теряет своей способности к полимеризации, используется в составе МПСХО. Порошкообразные отходы эпоксидной смолы собираются в системе аспирации при нанесении порошкового антикоррозионного покрытия на металлические поверхности. Собирающийся на фильтрах аспирационной системы порошкообразный полимер является неизбежными технологическими потерями процесса нанесения порошкового антикоррозионного покрытия. Порошкообразная эпоксидная смола, пройдя технологический передел нанесения на поверхность, не теряет своих термореактивных свойств и может быть использована как вторичное сырье. Выбор ингредиентов полимерной композиции значительно влияет на ее себестоимость и конкурентноспособность композиции на рынке строительных материалов [5, 6].

Оценка химической стойкости разработанных составов МПСХО проводилась на основании методических рекомендаций по определению антикоррозионных свойств защитных покрытий бетона и методик проведения лабораторных испытаний [7—10]. Оценивались изменения массы образцов и их химическая стойкость в результате воздействия на них химических реактивов, имитирующих агрессивную среду при эксплуатации. Образцы для проведения испытаний представлены на рис. 7.



Рис. 7. Образец для антикоррозионных испытаний: *a* — общий вид; *б* — срез образца

Толщина покрытия составляет 300...350 мкм. Выбор агрессивной среды обоснован ее распространенностью в сфере промышленного производства, а также возможность создания условий деструкции полимерных композитов с целью изучения ее протекания. В качестве агрессивных сред были взяты: вода, 5%-ный раствор соляной кислоты, 25%-ный водный раствор аммиака, 10%-ный раствор едкого натрия, насыщенный раствор хлорида натрия. Продолжительность экспонирования 360 сут. Результаты испытаний представлены в табл. Снижение коэффициента химической стойкости в растворе соляной кислоты составило 13 %, в растворе аммиака химическая стойкость по-

крытия снизилась на 17 %, в растворе едкого натрия процент снижения химической стойкости равен пяти.

Таким образом, по результатам первичных испытаний можно сделать вывод о стойкости образцов с покрытием МПСХО в условиях воздействия агрессивных сред.

*Изменение показателей химической стойкости полимерной композиции  
в различных агрессивных средах*

Показатели	Время экспонирования, сут						
	0	30	60	90	180	270	360
вода							
$\Delta m, \%$	0	0,015	0,018	0,018	0,028	0,032	0,028
$K_{xc}$	1	0,995	0,998	0,995	0,998	0,990	0,990
Насыщенный раствор хлорида натрия							
$\Delta m, \%$	0	0,030	0,028	0,058	0,098	0,100	0,098
$K_{xc}$	1	0,987	0,988	0,895	0,898	0,890	0,890
5%-й раствор соляной кислоты							
$\Delta m, \%$	0	0,050	0,068	0,078	0,119	0,136	0,138
$K_{xc}$	1	0,921	0,921	0,865	0,828	0,810	0,811
25%-й водный раствор аммиака							
$\Delta m, \%$	0	0,075	0,119	0,149	0,232	0,279	0,290
$K_{xc}$	1	0,974	0,942	0,922	0,871	0,855	0,835
10%-й раствор едкого натрия							
$\Delta m, \%$	0	0,059	0,125	0,142	0,182	0,258	0,236
$K_{xc}$	1	0,972	0,951	0,945	0,928	0,905	0,885

Агрессивная среда при контакте с полимерным покрытием оказывает влияние на изменение его структуры и свойств без нарушения целостности материала [11, 12]. Действие среды при этом можно разделить на физическое и химическое. Первое характеризуется проникновением молекул среды между макромолекулами полимера, носящим обратимый поверхностный и объемный характер. При этом поверхностная энергия на границе «композиция — среда» в результате адсорбции уменьшается, что влечет за собой образование и развитие трещин в покрытии. Объемное действие среды, с одной стороны, приводит к значительному ухудшению химической стойкости, которая зависит от изменения прочностных показателей образцов, а с другой — к увеличению гибкости полимерных цепей и пластификации композиции. Проникновение физически активных сред в тело осуществляется через микропоры и мелкие капилляры материалов (см. рис. 2), что влияет на изменение химической структуры полимерных материалов так как необратимые процессы, ухудшают основные физико-механические свойства композиции. Химическая структура композиции характеризуется наличием активных групп в цепях молекул (карбокисильных, гидрокисильных, аминных, кетонных), предполагает образование новых соединений в макромолекуле полимера при взаимодействии с агрессивной средой, обусловленное наличием двойных связей [13—15]. При всем многообразии химических процессов, вызывающих повреждение композитов в агрессивных средах, их можно разделить на следующие основные типы, охватывающие практически все виды деструкции:

процессы вымывания, при которых из композита десорбируют компоненты, растворимые в воде процессы химического взаимодействия реакционноспособных компонентов композита и электролита с образованием растворимых солей и других продуктов, растворимых в воде; образование в композите нерастворимых соединений, кристаллизующихся в порах и уплотняющих структуру на начальной стадии и разрушающих ее с увеличением объема сверхкритического предела [7—9]. Очевидно, что при действии на разработанную полимерную композицию агрессивных сред в ее структуре будут происходить химические процессы, аналогичные тем, что имеют место и для других полимеров. Но при повышенной химической стойкости покрытие МПХСО предотвращает разрушение бетонной поверхности.

Представленные результаты испытаний позволяют дать оценку эффективности разработанных составов МПХСО в условиях воздействия агрессивных сред. Изменение коэффициента химической стойкости не вышло за рамки значения 0,80, что может обеспечить надежную защиту и эксплуатацию изделий с полимерным покрытием в условиях воздействия агрессивных сред. Теоретическое обоснование вопросов повышения химической стойкости композиционных материалов на основе полимерных отходов и их экспериментальное подтверждение обуславливает актуальность поставленных цели и задач исследовательской работы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зарубина Л. П. Гидроизоляция конструкций, зданий и сооружений. Издательство БВХ Петербург, 2011. 272 с.
2. Батаев А. А., Батаев В. А. Композиционные материалы. Новосибирск: НГТУ, 2002. 384 с.
3. Калашикова А. С., Пушкарская О. Ю. Гидроизоляция строительного назначения — мировой и отечественный опыт // Инженерные проблемы строительного материаловедения, геотехнического и дорожного строительства : материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. Волгоград : ВолгГАСУ, 2013. С. 204—206.
4. Калашикова А. С., Акчурин Т. К., Пушкарская О. Ю. Полимерная система на основе отходов производства для гидроизоляции строительных конструкций // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал АИСИ. 2014. Вып. 1 (7). С. 53—57.
5. Калашикова А. С., Акчурин Т. К., Пушкарская О. Ю. Многокомпонентная полимерная система для гидроизоляции строительных конструкций // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2013. Вып. 35 (54). С. 99—105.
6. Голованова А. С., Акчурин Т. К., Пушкарская О. Ю. Системный подход к разработке составов многокомпонентных композиций на основе полимерных отходов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 40(59). С. 135—143.
7. Debska B., Licholai L. A study of the effect of corrosive solutions on selected physical properties of modified epoxy mortars // Construction and building materials. 2014. AUG 29. Vol. 65. P. 604—611. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.05.038
8. Steinberg M. The Preparation and Characteristics of Concrete — Polymer Composites // Multicomponent Polymer Systems, American Chemical Society, Advances in Chemistry. Washington : N.A.J. Platzer, 1971. № 9. Pp. 547—561.
9. Furr Howard L. Moisture penetration in concrete with surface coatings and overlays // Highway Res. Rec. 1973. № 423. Pp. 17—26.
10. Spiratos N. et al. Superplasticizers for Concrete: Fundamentals, Technology and Practice. Quebec, 2006. 323 s.
11. Комплексный подход при сравнительных исследованиях химической стойкости полимерного композиционного материала / Ю. И. Ладыгин, В. А. Башара, А. Н. Луговой, М. А. Титова, О. Г. Силинская // Строительные материалы. 2005. № 5. С. 52—53.

12. Защита строительных конструкций промышленных зданий от коррозии / под ред. Ф. М. Иванова и Ю. А. Савиной. М. : Стройиздат, 1973. 174 с.
13. Журков С. Н., Куксенко В. С., Слуцкер А. И. Микромеханика разрушения полимеров // Проблемы прочности. 1971. № 2. С. 45—50.
14. Защитные покрытия строительных конструкций / под ред. И. И. Ожиганова, Ю. Н. Зенченко. Киев : Будивельник, 1980. 160 с.
15. Зубов П. И., Сухорева Л. А. Структура и свойства полимерных покрытий. М. : Химия, 1982. 25 с.

© Голованова А. С., Акчурин Т. К., Пушкарская О. Ю., 2016

Поступила в редакцию  
в феврале 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Голованова А. С., Акчурин Т. К., Пушкарская О. Ю. Оценка эффективности многокомпонентной композиции на основе полимерных отходов в условиях воздействия агрессивных сред // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 57—65.

Об авторах:

**Голованова Анастасия Сергеевна** — аспирант кафедры строительных материалов и специальных технологий, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, what\_you\_know@mail.ru

**Акчурин Талгат Кадимович** — канд. техн. наук, проф., зав. кафедрой строительных материалов и специальных технологий, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

**Пушкарская Ольга Юрьевна** — канд. техн. наук, доц. кафедры технологий обработки и производства материалов, Волжский институт строительства и технологий (ВИСТех) — филиал ВолГАСУ. Российская Федерация, 404111, г. Волжский, пр. Ленина, 72

**A. S. Golovanova, T. K. Akchurin, O. Yu. Pushkarskaya**

## ASSESSMENT OF EFFICIENCY OF MULTICOMPONENT COMPOSITIONS BASED ON POLYMER WASTES UNDER THE INFLUENCE OF AGGRESSIVE ENVIRONMENT

Building constructions due to their structure are almost always permeable to gases and liquids, and not resistant to many chemical environments. Polymeric materials are used as protective coatings to eliminate the above drawbacks on the concrete surface. The chemical resistance of a polymer composition is decisive when choosing the components of polymer coatings to protect products and designs from the impact of the various aggressive factors. Designed cold-curing polymer composition is a finely divided particulate material, which is in a mixture with a solvent introduced immediately prior to application has impregnation properties, resulting in improved corrosion resistance, reduced water absorption, increase of strength of concrete structure. The effect of "self-healing" is provided by filling and blocking the pores and cracks in the surface layer of the sample. Reduction of the chemical resistance to hydrochloric acid is 13%, ammonia solution coating chemical resistance decreased by 17%, in sodium hydroxide solution the percentage reduction in chemical resistance is equal to five. Theoretical study issues of improving the chemical resistance of composite materials based on polymer wastes and their experimental verification determine the relevance of the goals and objectives of the research.

**Key words:** polymer wastes, epoxy composition, corrosion resistance.

### REFERENCES

1. Zarubina L. P. *Gidroizolyatsiya konstruktсий, zdanii i sooruzhenii* [Waterproofing of constructions, buildings and structures]. BVH Saint Petersburg Publishing House, 2011. 272 p.
2. Bataev A. A., Bataev V. A. *Kompozitsionnye materialy* [Composite materials]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2002. 384 p.

3. Kalashnikova A. S., Pushkarskaya O. Yu. [Waterproofing of construction purposes — international and domestic experience]. *Inzhenernye problemy stroitel'nogo materialovedeniya, geotekhnicheskogo i dorozhnogo stroitel'stva : materialy IV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Engineering problems of construction material engineering, geotechnical and road construction. Proc. of IV Int. Sci. and Eng. Conf.]. Volgograd, VSUACE Publ., 2013. Pp. 204—206.
4. Kalashnikova A. S., Akchurin T. K., Pushkarskaya O. Yu. [Polymer system based on waste products for waterproofing of building structures]. *Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik Prikaspiya : nauchno-tekhnicheskii zhurnal AISI* [Engineering and construction news of Caspian Sea region: scientific and engineering magazine AISI], 2014, 1 (7), pp. 53—57.
5. Kalashnikova A. S., Akchurin T. K., Pushkarskaya O. Yu. [Multicomponent polymer system for waterproofing of building structures]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2013, no. 35 (54), pp. 99—105.
6. Golovanova A. S., Akchurin T. K., Pushkarskaya O. Yu. [Systematic approach to the design of multicomponent composites based on polymeric wastes]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 40(59), pp. 135—143.
7. Debska B., Licholai L. A study of the effect of corrosive solutions on selected physical properties of modified epoxy mortars. *Construction and building materials*, 2014, AUG 29, vol. 65, pp. 604—611. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.05.038
8. Steinberg M. The Preparation and Characteristics of Concrete — Polymer Composites. *Multicomponent Polymer Systems, American Chemical Society, Advances in Chemistry*. Washington, N.A.J. Platzer, 1971, no. 9, pp. 547—561.
9. Furr Howard L. Moisture penetration in concrete with surface coatings and overlays. *Highway Res. Rec.*, 1973, no. 423, pp. 17—26.
10. Spiratos N. et al. *Superplasticizers for Concrete: Fundamentals, Technology and Practice*. Quebec, 2006. 323 s.
11. Ladygin Yu. I., Bashara V. A., Lugovoi A. N., Titova M. A., Silinskaya O. G. [Complex approach to comparative researches of chemical endurance of polymeric composite material]. *Stroitel'nye materialy* [Construction materials], 2005, no. 5, pp. 52—53.
12. Ivanov F. M. and Savina Yu. A., ed. *Zashchita stroitel'nykh konstruksii promyshlennykh zdanii ot korrozii* [Protection of building constructions of industrial buildings against corrosion]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1973. 174 p.
13. Zhurkov S. N., Kuksenko V. S., Slutsker A. I. Micromechanics of the failure of polymers. *Strength of Materials*, 1971, 3(2), pp. 162—167.
14. Ozhiganov I. I., Zenchenko Yu. N., ed. *Zashchitnye pokrytiya stroitel'nykh konstruksii* [Protective coatings of constructions]. Kiev, Budivel'nik Publ., 1980. 160 p.
15. Zubov P. I., Sukhoreva L. A. *Struktura i svoistva polimernykh pokrytii* [Structure and properties of polymer coatings]. Moscow, Khimiya Publ., 1982. 25 p.

*For citation:*

Golovanova A. S., Akchurin T. K., Pushkarskaya O. Yu. [Assessment of efficiency of multicomponent compositions based on polymer wastes under the influence of aggressive environment]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 57—65.

*About authors:*

**Golovanova Anastasiya Sergeevna** — Postgraduate student of Construction Materials and Special Technologies Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, what\_you\_know@mail.ru

**Akchurin Talgat' Kadimovich** — Candidate of Engineering Science, Professor, the Head of Construction Materials and Special Technologies Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

**Pushkarskaya Ol'ga Yur'evna** — Candidate of Engineering Science, Docent of Material Processing and Production Technology Department, Volzhskii Institute of Civil Engineering and Technology (VISTeh) — Affiliate Institute of VSUACE. 72, Lenina Prospekt, Volzhskii, 404111, Russian Federation

УДК 691.53

**Ю. Г. Иващенко, И. Л. Павлова, М. П. Кочергина**

*Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина*

### **СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ СИЛИКАТНАТРИЕВОГО СВЯЗУЮЩЕГО, МОДИФИЦИРОВАННОГО ВОДНЫМ РАСТВОРОМ АЦЕТАТА ЦИНКА**

Представлены результаты исследования модифицированных силикатнатриевых композиций методами рентгенофазового анализа и инфракрасной спектроскопии. Показано, что в твердеющей системе «силикатнатриевое связующее — водный раствор ацетата цинка» в диапазоне температур 110...450 °С образуются различные формы гидроксидов, силикатов и гидросиликатов цинка, что способствует повышению водостойкости силикатнатриевых композитов.

**Ключевые слова:** жидкое натриевое стекло, ацетат цинка, гидросиликат цинка, гидроксид цинка, ацетат натрия, коэффициент размягчения, водостойкость.

Разработка научных основ создания и технологических принципов производства композиционных строительных материалов (КСМ) с комплексом заданных свойств является одной из важнейших задач строительного материаловедения. Данная задача плодотворно решается на основе фундаментальных положений полиструктурной теории КСМ [1], методов системного анализа [2], научных дисциплин (материаловедения, физико-химической механики гетерогенных структур, физической и коллоидной химии, синергетики, термодинамики, физики неравновесных систем и др.), о чем свидетельствуют экспериментально-теоретические результаты работ многих научных коллективов [3—6].

Проблема создания строительных материалов с регулируемыми свойствами имеет два основных аспекта: материаловедческий и технологический. Первый предусматривает установление качественно-количественных взаимосвязей в классической модели «состав — структура — состояние — свойство материала («концептуальная формула 4С»)), а также закономерностей их изменения в эксплуатационном цикле. Второй касается технологического обеспечения заданных показателей качества.

Методологической основой решения проблем материаловедческого и технологического характера является подход, при котором строительные композиционные материалы представляются как сложноорганизованные материальные системы типа «структура в структуре». Для каждого масштабного уровня структуры устанавливаются закономерности формирования свойств композита от структурообразующих факторов [1]. При решении оптимизационных задач для КСМ выделяют от трех до пяти масштабных уровней как объектов исследования. Такое разделение носит не формальный, а объективный характер и оказывается весьма эффективным при направленном структурообразовании, формировании свойств материала и обосновании его технологии. При оценке структуры принимается во внимание масштабный фактор, значимость которого определяется позицией исследователя.

Одними из перспективных КСМ являются композиты на основе силикатнатриевых связующих, которые характеризуются высокой реакционной способностью, доступностью исходного сырья и технологичностью. Силикатнатриевые композиционные материалы представляют собой многокомпонентные системы, как правило, составленные из связующего с включением отвердителя, модифицирующих агентов, минерально-волоконистых наполнителей [6—13]. Управление процессами структурообразования и формирования свойств достигается оптимизацией составов с учетом модульности и плотности жидкого стекла, поверхностных свойств наполнителей, физико-химических характеристик модифицирующих добавок, а также технологических параметров в процессах гомогенизации смесей, формования изделий, их твердения.

Современные методы модифицирования позволяют улучшить функциональные свойства силикатнатриевых композиций и расширить область их применения. В этом плане достаточно актуальными являются исследования, направленные на решение проблемы, связанной с повышением водостойкости силикатнатриевых связующих. Применение модифицирующих соединений, содержащих ионы поливалентных металлов ( $Zn^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ ), способствуют образованию труднорастворимых комплексов (силикатов, гидросиликатов соответствующих металлов) в силикатнатриевой системе [13]. При этом для полноценного прохождения химических реакций необходимо, чтобы соединение металла гомогенно присутствовало в силикатнатриевой системе, и особенно на начальных этапах структурообразования композиций.

Рабочая гипотеза, положенная в основу исследований, заключается в возможном образовании труднорастворимых комплексов через стадию термического разложения и щелочного гидролиза цинковой соли уксусной кислоты (ацетата цинка) в системе силикатнатриевого связующего.

Ранее экспериментально установлено, что наиболее эффективно вводить ацетат цинка в силикатнатриевое связующее в виде водного раствора [14]. При этом для получения однородной смеси и повышения физико-механических характеристик композита наиболее рациональной является концентрация водного раствора ацетата цинка в пределах 20...28 %. Так, введение указанного раствора в связующее в пределах установленного оптимума (7...12 % по массе) позволяет повысить водостойкость образцов, подвергнутых тепловой обработке при низкотемпературном режиме ( $T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) на 20...25 % относительно контрольного состава (жидкое натриевое стекло с силикатным модулем 2,7; плотность раствора  $1,48\text{ г/см}^3$ ;  $\text{pH} = 11,6$ ; кремнефтористый натрий — 10 % по массе связующего; молотый кварцевый песок с  $S_{\text{уд}} = 2500\text{...}3300\text{ см}^2/\text{г}$ ). Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволяют предположить, что формирование труднорастворимых комплексов в исследуемой системе осуществляется уже на начальных этапах структурообразования композиций.

Целью настоящего исследования является изучение механизма образования труднорастворимых комплексов в системе «силикатнатриевое связующее — ацетат цинка», что позволит выявить факторы, которые могут оказывать доминирующее влияние на рассматриваемое свойство (водостойкость) на уровне формирования микроструктуры материалов.

Для оценки изменения фазового состава системы «силикатнатриевое связующее — водный раствор ацетата цинка» в зависимости от соотношения реагирующих компонентов проведен рентгеноструктурный фазовый анализ (РФА). Исследованию подвергались образцы на основе композиций, содержащих 24%-й водный раствор ацетата цинка в пределах 7...15 % по массе связующего (перемешивание сырьевой смеси осуществлялось в течение 1,5 мин, температура отверждения составляла 110 °С). РФА проводился на дифрактометре «ДРОН-4» с использованием рентгеновской трубки с медным анодом (Cu-K излучение). Для анализа дифрактограмм использовалась база данных PCPDFWIN, v. 2.02, 1999 г., Международного Центра по дифракционным данным (JCPDS).

На рис. 1 представлена дифрактограмма образца на основе немодифицированного связующего, находящегося в рентгеноаморфном состоянии.

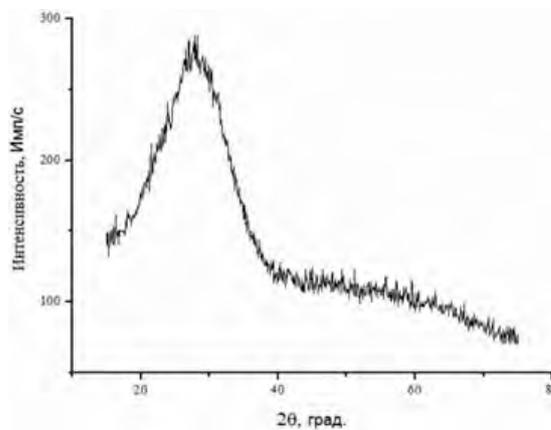
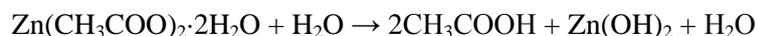


Рис. 1. Дифрактограмма силикатнатриевого связующего (жидкого натриевого стекла),  $T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$

В образцах связующего, модифицированного ацетатом цинка в виде 24%-го водного раствора, также фиксируется большое количество аморфной фазы (рис. 2). Однако, наличие отдельных кристаллических рефлексов рентгеновского спектра с большей долей вероятности свидетельствует о присутствии в системе фаз  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$  и  $\gamma\text{-Zn}(\text{OH})_2$ . Наличие характерных кристаллических рефлексов не исключает возможного присутствия в силикатнатриевой системе, модифицированной указанным раствором в пределах 12 % по массе связующего, фаз  $\delta\text{-Zn}(\text{OH})_2\cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  и  $\beta\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$ . Также на дифрактограммах образцов на основе композиций, содержащих модификатор от 7 % до 12 % по массе связующего, не наблюдается рентгеновских линий, идентичных фазам цинковой соли  $\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Данная фаза явно фиксируется на дифрактограммах образцов, содержащих модификатор в пределах от 13 % до 15 % по массе связующего, на которых также отсутствуют рефлексы, указывающие на возможное присутствие фаз  $\delta\text{-Zn}(\text{OH})_2\cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  и  $\beta\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$ . Следовательно, ацетат цинка, введенный в силикатнатриевое связующее в виде 24%-ого водного раствора в пределах 12 % по массе связующего, полностью подвергается щелочному гидролизу с образованием идентифицированных цинкосодержащих соединений.

На дифрактограммах всех образцов фиксируются характерные рентгеновские линии, указывающие на кристаллизацию ацетата натрия, образовавшегося по следующей схеме:



Следует отметить, что при увеличении содержания 24%-го водного раствора ацетата цинка в композициях с 10 % до 15 % по массе связующего, интенсивность характерных линий фаз  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ;  $\gamma\text{-Zn}(\text{OH})_2$  на дифрактограммах образцов практически не меняется (рис. 2). Отмечается усиление рефлексов фазы  $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , что вероятнее всего указывает на повышение его содержания в системе. Учитывая, что ацетат натрия является легко растворимым в воде соединением (76 г на 100 мл), экспериментальные данные, представленные в табл., позволяют сделать вывод, что его содержание в модифицированной системе является незначительным. Однако постепенное снижение значений коэффициента размягчения образцов, которое наблюдается при введении модификатора от 10 % до 15 % по массе связующего, может быть результатом повышения содержания ацетата натрия в модифицированной силикатнатриевой системе.

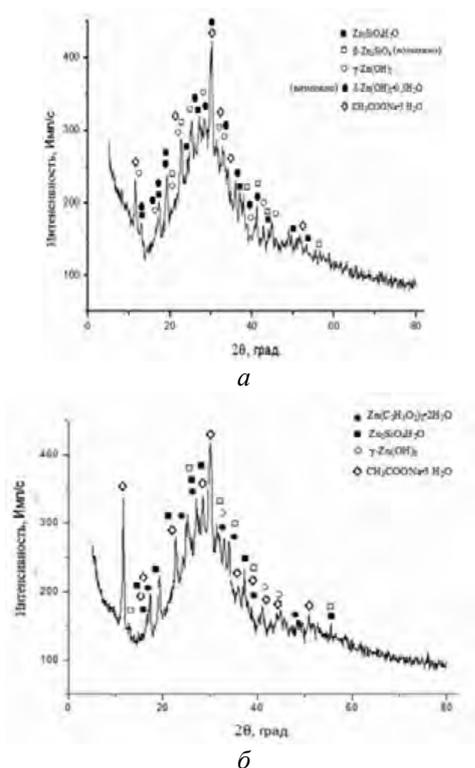


Рис. 2. Дифрактограммы: *а* — силикатнатриевого связующего, модифицированного 24%-м водным раствором ацетата цинка (10 % по массе связующего); *б* — силикатнатриевого связующего, модифицированного 24%-м водным раствором ацетата цинка (15 % по массе связующего), ( $T = 110^\circ\text{C}$ )

*Анализ фазового состава образцов  
при различных вариациях реагирующих компонентов методом РФА*

Но мер п/п	Состав сырьевой смеси	Идентифицированные соединения						K <sub>p</sub> **
		Zn(C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	γ-Zn(OH) <sub>2</sub>	δ-Zn(OH) <sub>2</sub> ·0,5H <sub>2</sub> O	CH <sub>3</sub> COONa·3H <sub>2</sub> O	Zn <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> O	β-Zn <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	
1	Жидкое натриевое стекло — 100 масс. ч., модификатор — 7 % по массе связующего	—	+	±*	+	+	±*	0,84
2	Жидкое натриевое стекло — 100 масс. ч., модификатор — 10 % по массе связующего	—	+	±*	+	+	±*	0,82
3	Жидкое натриевое стекло — 100 масс. ч., модификатор — 13 % по массе связующего	+	+	—	+	+	—	0,74
4	Жидкое натриевое стекло — 100 масс. ч., модификатор — 15 % по массе связующего***	+	+	—	+	+	—	0,59

*Примечания.*

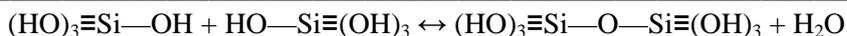
\*возможное присутствие соединения.

\*\* Коэффициент размягчения образцов на основе модифицированного связующего (при изготовлении образцов применялся наполнитель — тонкомолотый кварцевый песок ( $S_{уд} = 2500...3300 \text{ см}^2/\text{г}$ ), отвердитель — кремнефтористый натрий (10 % по массе связующего)).

\*\*\* Выраженная коагуляция жидкого натриевого стекла.

Таким образом, исследование модифицированных силикатнатриевых композиций на стадии низкотемпературного отверждения методом РФА показало, что в системе происходит образование труднорастворимого гидросиликата цинка  $Zn_2SiO_4H_2O$  и малорастворимой гидроокиси  $\gamma\text{-Zn(OH)}_2$ , что может быть результатом химического соосаждения при взаимодействии двух растворов (соответственно водного щелочного раствора силиката натрия и водного раствора цинковой соли уксусной кислоты). Осаждение силикатов щелочеземельных, многовалентных и тяжелых металлов возможно, как правило, при pH чуть меньших, чем pH осаждения соответствующих им гидроксидов, в связи с чем при смешивании двух растворов всегда образуются гидроксиды металлов и кремнегель (в большем или меньшем количестве в зависимости от интенсивности перемешивания) [15].

В работах В. А. Каргина и Е. В. Пустовалова при помощи микроскопических и рентгенографических исследований показано, что продуктом реакции между водным раствором силиката натрия и растворами солей двух- и трехвалентных металлов однозначно является гель кремневой кислоты. Выделяющаяся в результате взаимодействия двух растворов кремниевая кислота содержит в своем составе силанольные группы ( $\equiv\text{Si-OH}$ ), способные вступать в реакции поликонденсации с образованием силоксановых связей ( $\equiv\text{Si-O-Si}\equiv$ ), в результате чего образуются кремниевые кислоты с различной степенью полимеризации:



Есть сведения, что соли двухвалентных металлов (хлорид кальция, магния и стронция) способствуют более заметному увеличению молекулярной массы кремниевых кислот (по сравнению с хлоридом натрия) [16]. Однако вопрос, касающийся влияния электролитов непосредственно на поликонденсацию кремниевых кислот, требует своего развития.

В исследуемой системе при различной концентрации цинковой соли, помимо указанных трудно- и малорастворимых цинкосодержащих соединений наблюдается присутствие ацетата цинка.

Не полностью гидролизованный ацетат цинка и не вступившие в реакцию гидроксиды цинка способны подвергаться термолизу в диапазоне температур 180...450 °С с образованием окиси цинка и соответственно дополнительно участвовать в процессах синтеза труднорастворимых комплексов в силикатнатриевой системе, о чем могут свидетельствовать данные РФА. На дифрактограммах образцов, подвергнутых тепловой обработке при  $T = 450$  °С, появляется доминирующая кристаллическая фаза —  $\text{ZnSiO}_3$  (рис. 3).

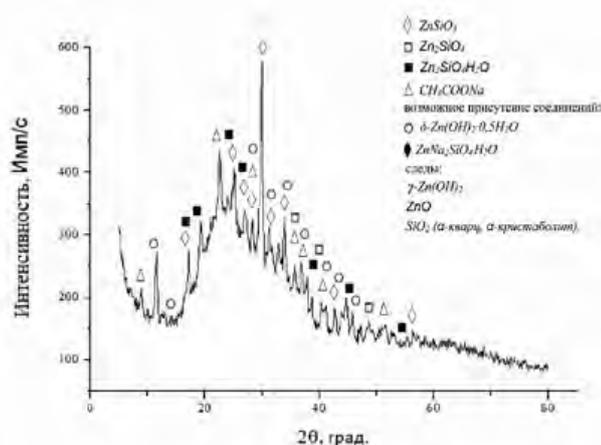
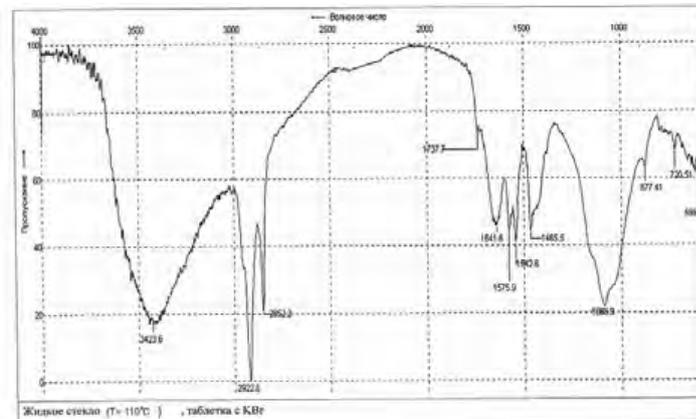


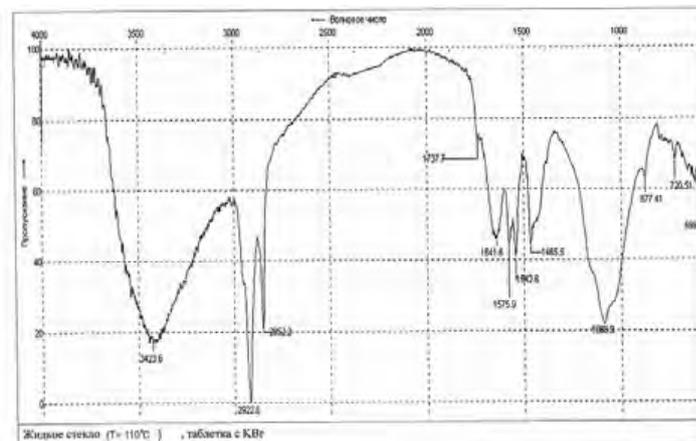
Рис. 3. Дифрактограмма силикатнатриевого связующего, модифицированного 24%-м водным раствором ацетата цинка (15 % по массе связующего),  $T = 450$  °С

Результаты РФА в комплексе с экспериментальными данными, представленными в табл. показывают, что изменение фазового состава при различных вариациях реагирующих компонентов в системе напрямую влияет на изменение значений коэффициента размягчения исследуемых образцов, на основе модифицированного связующего. Также непосредственное влияние может оказывать соотношение между синтезированными продуктами в системе. Однако идентификация различных форм силикатов цинка затруднена как из-за большого количества аморфной фазы, так и в связи с наложением дифракционных линий. Дополнительно различные модификации силикатов цинка и натрия могут находиться в аморфном состоянии. Поэтому не представляется возможным определение количественного содержания синтезированных соединений в модифицированной силикатнатриевой системе.

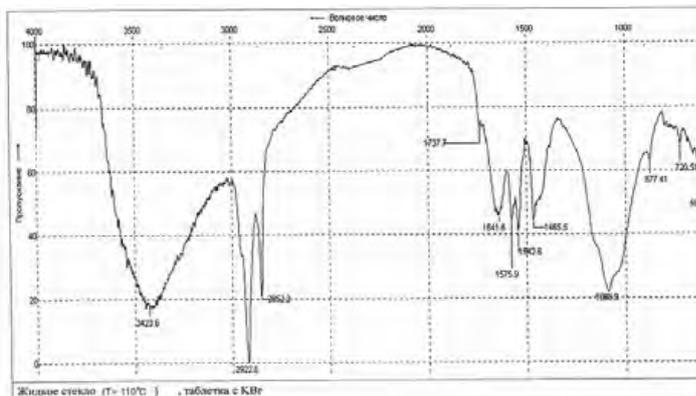
Для получения дополнительных сведений о структурно-химических изменениях модифицированного связующего проведен ИК-спектроскопический анализ аналогичных образцов (рис. 4).



*a*



*б*



*в*

Рис. 4. ИК-спектры: *a* — жидкое стекло; *б* — жидкое стекло + ацетат цинка в виде водного раствора (0,9 % по массе ж/с в пересчете на атом цинка); *в* — жидкое стекло + ацетат цинка в виде водного раствора (4,5 % по массе ж/с в пересчете на атом цинка), таблетка КВг

Инфракрасные спектры образцов регистрировались на ИК-Фурье спектрометре Infracum FT-801 в таблетках с KBr.

В ИК-спектре жидкого натриевого стекла (рис. 4, а) выделяются следующие характеристические полосы поглощения: широкая полоса в области  $3500\text{ см}^{-1}$  валентные колебания OH; полоса в области  $1660\text{ см}^{-1}$  — деформационные колебания OH. Интервалу частот  $800\text{...}1200\text{ см}^{-1}$  принадлежит область интенсивного поглощения тетраэдров  $\text{SiO}_4$ ; интервал частот  $2000\text{...}3700\text{ см}^{-1}$  соответствует колебаниям гидроксидов. Полосы поглощения в области  $1730, 1540\text{...}1570, 1460\text{ см}^{-1}$  характерны для спектра карбоната натрия. Следует отметить, что на дифрактограммах образцов, подвергнутых тепловой обработке при  $T = 110\text{ }^\circ\text{C}$ , не обнаружено его четко выраженных рефлексов (см. рис. 2).

На ИК-спектрах модифицированного связующего (рис. 4) наблюдаются полосы ионизированной карбоксильной группы  $\text{COO}^-$  в области  $1570\text{ см}^{-1}$  и  $1420\text{...}1440\text{ см}^{-1}$ , деформационных колебаний  $\text{CH}_3$  групп в области  $1310\text{ см}^{-1}$ , указывающие на образовании ацетата натрия [17]. Следует отметить, что в работе [18] автор также связывает усиление линий дублета  $\text{COO}^-$   $1558/1416\text{ см}^{-1}$  в ИК-спектрах вяжущей системы «жидкое стекло — ацетат этиленгликоля» с образованием ацетата натрия.

С повышением концентрации ацетата цинка и соответственно катионов  $\text{Zn}^{2+}$  в системе связующего на ИК-спектре наблюдается смещение полосы, относимой к колебаниям  $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$  [19, 20] по направлению к более низким частотам на  $43,4\text{ см}^{-1}$  (от  $1088,9\text{ см}^{-1}$  до  $1045,5\text{ см}^{-1}$ ) (рис. 4, б). Можно предположить, что смещение максимума в указанном районе вызвано постепенным замещением иона Si ионом Zn в тетраэдрической позиции.

Кроме этого, на ИК-спектре силикатнатриевой системы с предельной концентрацией цинкосодержащего модификатора (рис. 4, в) визуализируется поглощение в области  $900\text{ см}^{-1}$  ( $925, 21\text{ см}^{-1}$ ), появление которого в первую очередь может быть объяснено заменой атомов Si в части кремнекислородных тетраэдров на атомы Zn [21]. Слабая полоса поглощения  $925, 21\text{ см}^{-1}$  вероятнее всего характеризует связь  $\text{Zn}-\text{O}-\text{Si}$ .

Результаты исследований системы «силикатнатриевое связующее — водный раствор ацетата цинка» методами РФА и ИКС достаточно хорошо согласуются между собой, что подтверждает достоверность предыдущих выводов.

Таким образом, установлено химическое взаимодействие в системе «силикатнатриевое связующее — водный раствор ацетата цинка», подтверждаемое образованием трудно- и малорастворимых цинкосодержащих соединений, что способствует повышению водостойкости силикатнатриевых композитов. При этом процессы синтеза новообразований в исследуемой системе определяются показателем pH реакционной смеси [22], соотношением и интенсивностью взаимодействия реагирующих компонентов, температурой нагрева. Установление взаимосвязи указанных факторов с физико-механическими, эксплуатационными свойствами, технологическими параметрами позволит осуществить конструирование и получение водостойких силикатнатриевых композиционных материалов с регулируемыми характеристиками.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соломатов В. И., Выровой В. Н., Бобрышев А. Н. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов. Ташкент: ФАН, 1991. 342 с.
2. Danilov A., Garkina I. Systems approach to the modeling and synthesis of building materials // Contemporary Engineering Sciences. 2015. Vol. 8. № 5. Pp. 219—225.
3. Иващенко Ю. Г. Структурообразование, свойства и технология модифицированных фурановых композитов: дис... д-ра техн. наук. Саратов, 1998. 602 с.
4. Баженев Ю. М., Чернышов Е. М., Коротких Д. Н. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы // Строительные материалы. 2014. № 3. С. 6—14.
5. Соломатов В. И., Бобрышев А. П., Прошин А. П. Кластеры в структуре и технологии композиционных строительных материалов // Известия вузов. Строительство. 1983. № 4. С. 56—61.
6. Korolev E. V., Grishina A. N. Mixture of the Reaction Products during Hardening of the Water Glass Radiation-Protective Composites // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 746. Pp. 289—292.
7. Инновационные теплоизоляционные материалы на основе силикатнатриевых композитов / Ю. Г. Иващенко, И. Л. Павлова, А. В. Страхов, Н. А. Иващенко, М. П. Кочергина, Н. В. Хаюк // Сб. науч. трудов по материалам Международной науч.-практич. конф. «Ресурсо-энергоэффективные технологии в строительном комплексе региона». Саратов: СГТУ, 2013. С. 188—189.
8. Venkateswara Rao A., Nilsen E., Einarsrud M.-A. Effect of precursors, methylation agents and solvents on the physicochemical properties of silica aerogels prepared by atmospheric pressure drying method // Journal of Non-Crystalline Solids. 2001. Pp. 165—171.
9. Read G. W., Veater P. M. Advances in technology of corrosion resistant silicate mortar // Corrosion. 1973. № 7. Pp. 285—289.
10. Mohan R. B., Srinivasan R. S., Gupta R. G. Sodium and potassium silicate based acid resistant cements // Indian Stand. Inst. Bull. 1973. Vol. 25. № 9. Pp. 371—376.
11. Figovsky O., Borisov Yu., Beilin D. Nanostructured Binder for Acid-Resisting Building Materials // J. Scientific Israel-Technological Advantages. 2012. Vol. 14. № 1. Pp. 7—12.
12. Figovsky O., Beilin D. Improvement of Strength and Chemical Resistance of Silicate Polymer Concrete // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2009. Vol. 3. № 2. Pp. 97—101.
13. Buckermann W.-A., Müller-Warmuth W., Frischat G. H. A further <sup>29</sup>Si MAS NMR study on binary alkali silicate glasses // Glastechn. Ber. 1992. Pp. 8—21.
14. Иващенко Ю. Г., Павлова И. Л., Кочергина М. П. Повышение заданных свойств силикатнатриевых композитов, модифицированных цинкосодержащими органическими соединениями // Национальная ассоциация ученых (НАУ). Ежемесячный научный журнал. 2015. № 1(6). С. 116—118.
15. Корнеев В. И., Данилов В. В. Жидкое и растворимое стекло. СПб.: Стройиздат, 1996. 216 с.
16. Шабанова Н. А., Саркисов П. Д. Золь-гель технологии. Нанодисперсный кремнезем. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 328 с.
17. Идентификация органических соединений / Р. Шрайнер, Р. Фьюзон, Д. Кертин, Т. Моррилл: пер. с англ. М.: Мир, 1983. 704 с.
18. Задов А. Е. Вяжущие композиции на основе жидкого стекла и ацетатов этиленгликоля: дис... канд. техн. наук. Ленинград, 1991. 20 с.
19. Лазарев А. Н. Колебательные спектры и строение силикатов. Л.: Наука, 1968. 347 с.
20. Рыжков И. В., Толстой В. С. Физико-химические основы формирования свойств смесей с жидким стеклом. Харьков: Высшая школа, 1975. 137 с.
21. Сидоров В. И., Малявский Н. И., Покидько Б. В. Использование модифицированного жидкого стекла для получения водостойких утеплителей методом холодного вспенивания // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2002. № 8. С. 27—32.
22. Вассерман И. М. Химическое осаждение из растворов. М.: Химия, 1980. 205 с.

© Иващенко Ю. Г., Павлова И. Л., Кочергина М. П., 2016

Поступила в редакцию  
в январе 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Иващенко Ю. Г., Павлова И. Л., Кочергина М. П. Структурообразование силикатнатриевого связующего, модифицированного водным раствором ацетата цинка // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 66—76.

Об авторах:

**Иващенко Юрий Григорьевич** — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительных материалов и технологий, Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина. Российская Федерация, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, [psk@sstu.ru](mailto:psk@sstu.ru)

**Павлова Ирина Леонидовна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительных материалов и технологий, Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина. Российская Федерация, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, [pavlovail29@mail.ru](mailto:pavlovail29@mail.ru)

**Кочергина Мария Петровна** — аспирант кафедры строительных материалов и технологий, Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина. Российская Федерация, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, [m\\_kochergina@list.ru](mailto:m_kochergina@list.ru)

**Yu. G. Ivashchenko, I. L. Pavlova, M. P. Kochergina**

## STRUCTURE FORMATION OF SILICATE-NATRIC BINDER MODIFIED BY ZINC ACETATE WATER SOLUTION

The results of the study of modified silicate-natric compositions by X-ray diffraction analysis and infrared spectroscopy are presented. It is shown that in the system of hardening silicate-natric binder — zinc acetate water solution in the temperature range 110...450 °C various forms of zinc hydroxide and silicates are formed that improve water resistance silicate-natric composites.

**Key words:** liquid natric glass, zinc acetate, zinc hydrosilicate, zinc hydroxyde, sodium acetate, cushioning parameter, water resistance.

### REFERENCES

1. Solomatov V. I., Vyrovoy V. N., Bobryshev A. N. *Polistrukturnaya teoriya kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov* [Polystructural theory of composite construction materials]. Tashkent, FAN Publ., 1991. 342 p.
2. Danilov A., Garkina I. Systems approach to the modeling and synthesis of building materials. *Contemporary Engineering Sciences*, 2015, 8(5), pp. 219—225.
3. Ivashchenko Yu. G. *Strukturoobrazovanie, svoystva i tekhnologiya modifitsirovannykh furanovykh kompozitov: dis... d-ra tekhn. nauk* [Structure formation, properties and technology of modified furan composites. Dr. Eng. Sci. Dis.]. Saratov, 1998. 602 p.
4. Bazhenov Yu. M., Chernyshov E. M., Korotkih D. N. [Designing of structures of modern concrete: defining principles and technological platforms]. *Stroitel'nye materialy* [Construction materials], 2014, no. 3, pp. 6—14.
5. Solomatov V. I., Bobryshev A. P., Proshin A. P. [Clusters in the structure and technology of composite construction materials]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of higher education institutions. Construction], 1983, no. 4, pp. 56—61.
6. Korolev E. V., Grishina A. N. Mixture of the Reaction Products during Hardening of the Water Glass Radiation-Protective Composites. *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 746, pp. 289—292.
7. Ivashchenko Yu. G., Pavlova I. L., Strakhov A. V., Ivashchenko N. A., Kochergina M. P., Hayuk N. V. [Innovative heat-insulating materials based on silicate sodium composites]. *Sb. nauch. trudov po materialam Mezhdunarodnoi nauch.-praktich. konf. «Resurso-energoeffektivnye tekhnologii v stroitel'nom komplekse regiona* [Proc. of Int. conf. "Resource power efficient technologies in the construction complex of the region"]. Saratov, SGTU Publ., 2013. Pp. 188—189.
8. Venkateswara Rao A., Nilsen E., Einarsrud M.-A. Effect of precursors, methylation agents and solvents on the physicochemical properties of silica aerogels prepared by atmospheric pressure drying method. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2001, pp. 165—171.

9. Read G. W., Veater P. M. Advances in technology of corrosion resistant silicate mortare. *Corrosion*, 1973, no. 7, pp. 285—289.
10. Mohan R. B., Srinivasan R. S., Gupta R. G. Sodium and potassium silicate based acid resistant cements. *Indian Stand. Inst. Bull.*, 1973, 25(9), pp. 371—376.
11. Figovsky O., Borisov Yu., Beilin D. Nanostructured Binder for Acid-Resisting Building Materials. *J. Scientific Israel-Technological Advantages*, 2012, 14(1), pp. 7—12.
12. Figovsky O., Beilin D. Improvement of Strength and Chemical Resistance of Silicate Polymer Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2009, 3(2), pp. 97—101.
13. Buckermann W.-A., Müller-Warmuth W., Frischat G. H. A further <sup>29</sup>Si MAS NMR study on binary alkali silicate glasses. *Glastechn. Ber.*, 1992. Pp. 8—21.
14. Ivashchenko Yu. G., Pavlova I. L., Kochergina M. P. [Increase the desired properties of sodium silicate composites modified zinc-containing organic compounds]. *Natsional'naya assotsiatsiya uchenykh (NAU). Ezhemesyachnyi nauchnyi zhurnal* [National Association of Scientists (NAS). Monthly scientific journal], 2015, no. 1(6), pp. 116—118.
15. Korneev V. I., Danilov V. V. *Zhidkoe i rastvorimoe steklo* [Liquid and soluble glass]. Saint Petersburg, Stroiizdat Publ., 1996. 216 p.
16. Shabanova N. A., Sarkisov P. D. *Zol'-gel' tekhnologii. Nanodispersnyi kremnezem* [Sol-gel technology. Nano-disperse silicon dioxide]. Moscow, BINOM. Laboratoriya Znaniy Publ., 2012. 328 p.
17. Shriner R., Fuson R. S., Curtin D. Y., Morrill T. S. *The systematic identification of organic compounds. A laboratory Manual*. New York, John Wiley and Sons.
18. Zadov A. E. *Vyazhushchie kompozitsii na osnove zhidkogo stekla i atsetatov etilenglikolya: dis... kand. tekhn. nauk* [Binding compositions based on liquid glass and ethylene glycol acetates. Cand. Eng. Sci. Dis.]. Leningrad, 1991. 20 p.
19. Lazarev A. N. *Kolebatel'nye spektry i stroenie silikatov* [Vibration spectrums and the structure of silicates]. Leningrad, Nauka Publ., 1968. 347 p.
20. Ryzhkov I. V., Tolstoi V. S. *Fiziko-khimicheskie osnovy formirovaniya svoystv smesei s zhidkim steklom* [Physical and chemical principals of formation of properties of mixtures with liquid glass]. Khar'kov, Vysshaya Shkola Publ., 1975. 137 p.
21. Sidorov V. I., Malyavskii N. I., Pokid'ko B. V. [Use of modified liquid glass to receive waterproof heat insulators by cold foaming method]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Construction], 2002, no. 8, pp. 27—32.
22. Vasserman I. M. *Khimicheskoe osazhdenie iz rastvorov* [Chemical solution deposition]. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 205 p.

*For citation:*

Ivashchenko Yu. G., Pavlova I. L., Kochergina M. P. [Structure formation of silicate-natric binder modified by zinc acetate water solution]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 66—76.

*About authors:*

**Ivashchenko Yuri Grigor'evich** — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Construction Materials and Technology Department, Saratov State Technical University named after Yu. A. Gagarin. 77, Politekhnikeskaya St., Saratov, 410054, Pussian Federation, [psk@sstu.ru](mailto:psk@sstu.ru)

**Pavlova Irina Leonidovna** — Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Construction Materials and Technology Department, Saratov State Technical University named after Yu. A. Gagarin. 77, Politekhnikeskaya St., Saratov, 410054, Pussian Federation, [pavlovail29@mail.ru](mailto:pavlovail29@mail.ru)

**Kochergina Mariya Petrovna** — Postgraduate Student of Construction Materials and Technology Department, Saratov State Technical University named after Yu. A. Gagarin. 77, Politekhnikeskaya St., Saratov, 410054, Pussian Federation, [m\\_kochergina@list.ru](mailto:m_kochergina@list.ru)

УДК 541.135

**С. В. Камкова<sup>а</sup>, И. А. Куликова<sup>б</sup>, В. Т. Фомичев<sup>б</sup>, Н. А. Филимонова<sup>в</sup>**

<sup>а</sup> *МОУ СОШ № 33, г. Волгоград*

<sup>б</sup> *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

<sup>в</sup> *Волгоградский государственный аграрный университет*

## **ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ФУНГИЦИДНЫХ СВОЙСТВ БИОЦИДА НА ОСНОВЕ БИШОФИТА ДЛЯ ЗАЩИТЫ БЕТОНОВ ОТ БИОПОВРЕЖДЕНИЙ**

Приводится исследование фунгицидных свойств дезинфектанта-биоцида, полученного методом электролиза растворов бишофита на постоянном токе с цинковыми анодами, для защиты бетонов от биоповреждений.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** биоцид, бишофит, фунгициды, биоповреждения.

Биоповреждения, а точнее — поиск путей защиты от них является в настоящее время одной из самых актуальных, важных и серьезных проблем в строительстве, поскольку причиняемый ущерб достигает десятков миллиардов рублей в год и продолжает увеличиваться по мере накопления человеком запасов материалов и изделий.

Конкретными реагентами биосферы являются практически все виды микроорганизмов (микробы, бактерии), низшие и высшие растения, грибы всех видов, а также насекомые, животные, птицы. Данные литературы свидетельствуют, что более 40 % общего объема биоповреждений связано с деятельностью последних [1—3].

Разрушение строительных объектов является более сложным процессом при воздействии на них биомикроорганизмов и микроорганизмов, чем при воздействии чисто химических сред. Например, в результате действия микроорганизмов (грибов) могут образовываться трещины (механическое разрушение) за счет разрастающегося мицелия, изменение упруго-прочностных свойств материала за счет выделения продуктов метаболизма, использование грибами компонентов строительных материалов в качестве источника энергии (пищи) [4, 5].

Одним из важнейших агентов биоповреждения строительных материалов являются микроскопические грибы-микросциеты (в обиходе их обычно называют плесневыми грибами). Наибольший ущерб наносят мицелиальные грибы и бактерии, на долю которых приходится до 20 % от общего количества биоповреждений. Этот вид разрушения наиболее часто встречается при эксплуатации покрытий в условиях повышенной влажности при температуре 25...40 °С [6].

В связи с ухудшающейся экологической обстановкой в городах происходит резкое увеличение численности микромицетов на антропогенных субстратах. В результате повышается их роль в деструкционных процессах. В качестве источника питания грибы могут использовать вещества, входящие в состав строительных и отделочных материалов, и органику, присутствующую в пылевых осаждениях.

Грибы способны изменять и даже разрушать структуру материалов. Это приводит к снижению прочности элементов конструкций, преждевременному

разрушению строительных элементов или зданий. Неконтролируемый рост микроскопических грибов, происходящий как на поверхности, так и в толще строительных материалов, в конечном итоге приводит к возникновению биоповреждений, необратимым изменениям в свойствах материалов.

Микромицеты, занимая новую экологическую нишу, образуют сообщества, которые заражают поверхности строительных конструкций. Заражение происходит при нарушении температурного режима, определенного уровня влажности работы вентиляционных систем, возникновении различных экстремальных ситуаций (разрывов труб, протечек и т. д.), нарушении строительно-монтажных технологий. Этим наносится существенный вред жилому фонду, а также памятникам архитектуры.

Биоповреждения неорганических строительных материалов например, бетона, как правило, сводятся к нарушению сцепления между составляющими его компонентами. Это происходит в результате воздействия органических или минеральных кислот микробного происхождения. Сооружения из бетона разрушаются также и вследствие химических реакций, возникающих между цементным камнем и продуктами жизнедеятельности микроорганизмов.

Продукты жизнедеятельности микроорганизмов (кислоты, аммиак, сульфиды и пр.) агрессивны и способны вызывать разрушение не только бетона, но и арматуры в железобетонных конструкциях.

Органические и неорганические кислоты, а также сероводород образуются тионовыми, углеводородокисляющими, нитрифицирующими, сульфатредуцирующими бактериями, дрожжами, грибами и прочими микроорганизмами. Литотрофные бактерии, как наиболее активные в коррозионном отношении, окисляют неорганические соединения (сульфиды, серу, аммиак, сульфат закиси железа). При этом образуется серная и азотная кислоты. С позиции условий развития процессов биокоррозии, тесно связанных с жизнедеятельностью живых организмов, необходимо различать два основных случая, имеющих значение при разработке мер защиты от биокоррозии.

В первом случае, биоорганизмы — растения, животные, но чаще всего микроорганизмы — пребывают в непосредственном контакте с наружной либо внутренней поверхностью конструкции. В процессе метаболизма они взаимодействуют с материалом и, как результат, снижают прочность или ухудшают эксплуатационные качества материала, сокращают сроки эксплуатационной пригодности конструкции.

Во втором случае, биоорганизмы — продуценты веществ, агрессивных к строительному материалу, но непосредственно в пространстве и времени не связанных со строительной конструкцией. Коррозия может развиваться на значительном удалении от области обитания биоорганизмов, которые вырабатывают эти агрессивные для строительного материала вещества. Этот процесс может быть отдален во времени от того момента, когда наступает непосредственный контакт агрессивного компонента и строительной конструкции.

В настоящее время активно внедряются методы улучшения свойств композиционных материалов (КМ) так называемыми бессинтезными способами, в частности введением добавок, что даст возможность более широкого промышленного использования композиционных материалов на основе фунгицидов. С целью повышения биологической стойкости бетона в его состав вводятся добавки, обеспечивающие позитивную коррозию. Этот принцип,

предложенный В. И. Соламатыным [7, 8], предусматривает активное взаимодействие добавок с проникающей агрессивной средой и последующую ее нейтрализацию.

Биоциды — вещества или препараты, которые используются для химической защиты от биоповреждений [9]. При анализе литературных источников можно выделить, что биоциды, применяемые для уничтожения плесневых грибов, имеют определенную опасность. Их также называют фунгицидами. По химическому строению биоциды можно классифицировать на группы, представленные в табл. 1 [10].

Т а б л и ц а 1

*Классификация биоцидов по химическому строению*

Биоциды	Опасность от их использования
<b>Органические соединения</b>	
Монохлорацетоаминоканифоль, 4, 5, 6-трихлор-бензоксазаинон, н-доцилбензилпиридиний-хлорид, бензизостазолин-3-ОН, 2-бензилгендазолларбамаат, гептахлорнафтол и др.	Действие этих биоцидов носит временный характер, они мигрируют на поверхность изделия и вступают во взаимодействие с микроорганизмами. Являются токсичными для организма
<b>Металлорганические соединения</b>	
Этилртутиосалицилат натрия, фенилацетат ртути, фенилртутиацетат, нафтенат меди, ттиметилловоометакрилат, триэтиловоохлорид, трибутилметаларилоксистаннат и др.	Отсутствие бактерицидной активности, высокая токсичность и очень высокая стоимость
<b>Антибиотики</b>	
Нистатин, биомицин, тетрациклин, трихотексин, грезеофульвин, стрептомицин, пурамицин и др.	—
<b>Неорганические соединения</b>	
Хлорокись меди, хлорокись цинка, окись цинка, хлорид цинка, бихромат аммония, тетрафторборат аммония, фтористый натрий, пиросульфат натрия и др.	Под воздействием хлора корродируют металлические, железобетонные и иные конструкции. Хлор относится к боевым отравляющим веществам. Биоциды на основе солей меди снижают прочность цементного камня, медь является ядом. Соединения цинка имеют очень низкий уровень токсичности.

Данные таблицы указывают на то, что более перспективными в качестве биоцидов для защиты строительных материалов, более экологически безопасными для строительных объектов и человека являются неорганические соединения на основе цинка.

Ниже приводятся данные по исследованию влияния нового биодезинфектанта (биоцида), полученного электролизом растворов бишофита [11, 12], на постоянном токе с цинковыми анодами, на свойства возбудителей биологического разрушения модельных бетонных конструкций.

В предварительных исследованиях использовался раствор бишофита [13, 14] как основа для электрохимического получения гипохлорита цинка [15]. В процессе электролиза на электродах происходят процессы образования хлорноватистой и бромноватистой кислот, ионов цинка с щелочью с образованием гипохлорита и гипобромита магния и цинка [12]. Часть получающихся гипохлоритов в значительной степени диссоциирует с образованием ионов, которые способны к дальнейшему анодному окислению с образованием хлорит-иона. Образующиеся при электролитическом окислении раствора природного бишофита хлорид-, гипохлорит-, гипобромит-ионы и ионы цинка при взаимодействии создают синергический эффект, усиливающий бактерицидную активность конечного дезинфицирующего продукта, что отличает получаемый продукт от используемых в настоящее время.

Вследствие перемешивания анолита и католита происходит взаимодействие щелочи с хлорноватистой, а также с бромноватистой кислотой. При этом образуется гипохлорит и гипобромит магния и цинка.

Возникающие в результате смешения мицеллярные структуры содержат ионы гипохлоритов, цинка и магния, что дает возможность использовать этот продукт как для коагуляции, так и для обеззараживания строительных растворов бетона.

Установлено, что названные соединения помимо высоких показателей термо- и огнестойкости, гидрофобизирующих свойств, инертности к большинству материалов, отличных диэлектрических и теплофизических характеристик, обладают сильными и стойкими микоцидными (фунгицидными) свойствами, по отношению к плесневым грибам. Они могут быть добавками для придания микоцидных свойств к строительным материалам и конструкциям.

Эффективное использование фунгицидов возможно, если они отвечают следующим требованиям:

- 1) способны проникать в места своего действия — внутрь или на поверхности клетки гриба — и накапливаться там;
- 2) могут взаимодействовать по крайней мере с одним жизненно важным для гриба процессом, определяющим его патогенность;
- 3) сохраняют достаточно долгое время фунгицидность на местности, противостоят выдуванию, вымыванию и химическим превращениям;
- 4) производство фунгицида базируется на доступном сырье и отработанной технологии;
- 5) не изменяются при хранении достаточно долгое время и не повреждают тару, которая должна быть изготовлена из дешевого материала;
- 6) обладают возможно малой токсичностью для людей, животных и растений, т. е. не оказывают отрицательного воздействия на экосистему, причем этим свойством характеризуется не только сам фунгицид, но и его метаболиты.

Замечено, что введение в состав цементных композитов исследуемого раствора способствует повышению биостойкости композитов при их длительном выдерживании в среде. Установлено, что высокую фунгицидную активность придает гипохлорит и гипобромит цинка. При содержании этой добавки в количестве 0,5 мас. ч. и более на 100 мас. ч. связующего (цемента) при испытании наблюдается зона задержки роста грибов на область до 20 мм. Известно, что оптимальной для роста грибов является среда с  $pH = 3,0...6,0$ .

С целью установления их биосопротивления исследован цемент с добавлением исследуемого раствора с разной концентрацией.

Проведенные исследования показали, что наибольшее влияние на биостойкие свойства цементного камня с добавкой раствора фунгицида цинка оказывают концентрация химического раствора, применяемого для обработки поверхности добавки, и количественное содержание вводимого в смесь наполнителя.

Отсутствием роста грибов характеризуются составы, содержащие соответственно 0,5 % раствора от массы цементного связующего.

Важным требованием к химическим средствам защиты от биологического разрушения является их способность совмещаться с компонентами КМ, длительное время защищать материалы, быть химически стабильными.

Фунгицидная активность данной добавки была изучена в композитах на основе цементных связующих. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

*Результаты испытаний композитов с биоцидом*

Состав композита	Концентрация содержания цинка в добавке, г. экв/л	Степень роста грибов, баллы	Характеристика по ГОСТу
Цемент, песок, вода (в соотношении 1:3)	0	4	Негрибостойкий
	0,65	2	Грибостойкий
	1,3	0	Фунгицидный
	2	0	Фунгицидный
Цемент, песок, вода (в соотношении 1:2)	0	4	Негрибостойкий
	0,65	2	Грибостойкий
	1,3	1	Фунгицидный
	2	0	Фунгицидный
Цемент, песок, вода (в соотношении 1:4)	0	4	Негрибостойкий
	0,65	2	Грибостойкий
	1,3	0	Фунгицидный
	2	0	Фунгицидный
Поверхностно-смоченный образец	1,3	1	Грибостойкий

Полученные результаты свидетельствуют, что все рассмотренные концентрации состава при введении биоцида приобретает фунгицидные свойства.

Степень разрушения строительных конструкций, зданий и сооружений, а также степень их зараженности грибами и бактериями зависит от состава и плотности материалов, из которых они изготовлены, и также от влажностью помещений. В этой связи было изучено влияние исследуемой фунгицидной добавки на биостойкость и прочностные характеристики цементных композитов (камня). В табл. 3 приведены результаты исследований обрастаемости цементных композиций, содержащих биоцидную добавку.

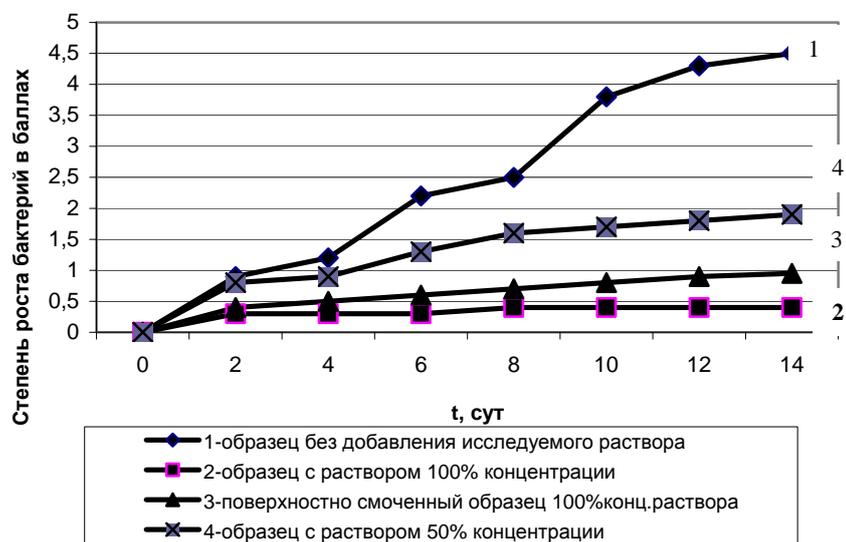
Таблица 3

*Обрастимость композитов в условиях воздействия мицелиальных грибов*

Номер состава	Содержание биоцидной добавки, мас. ч.	Наполнитель (песок), мас.ч.	Устойчивость к действию грибов, балл		Характеристика по ГОСТ
			Метод 1	Метод 3	
1	0	—	3	5	Негрибостойкий
2	5	—	1	4	Грибостойкий
3	10	—	0	1	Фунгицидный
4	0	300	3	5	Негрибостойкий
5	5	300	1	3	Грибостойкий
6	10	300	0	2	Фунгицидный

Из результатов исследования следует, что устойчивость цементного камня (композита), содержащего биоцидную добавку с разным количеством и концентрацией, к действию мицелиальных грибов различается. При испытании по первому методу у составов, содержащих биоцидный препарат в количестве 5 мас. ч., грибостойкость повышается, а при 10 мас. ч. проявляются фунгицидные свойства. При эксперименте на биостойкость по третьему методу введение исследуемой добавки в количестве 5 и 10 мас. ч. приводит к снижению обрастаемости с 5 баллов до 1 и 2 баллов.

Для оценки влияния биоцидной добавки на степень роста грибов на фрагменте цементного камня использовалась методика по ГОСТ 9049—75. Данные (рис.) показывают, что использование добавок биоцида позволяет практически полностью прекратить развитие грибов в течение 30 сут.



Влияние концентрации биоцидного раствора в исследуемом композите по методу (ГОСТ 9049—75) на степень роста грибов

Использование разработанного препарата, обладающего фунгицидными свойствами, в составе строительной смеси позволяет получить долговечные строительные материалы для зданий, контактирующих с биологически активными средами, и могут быть использованы для защиты от биоповреждений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Флеров Б. К. Биологические повреждения материалов и изделий // Проблемы биологических повреждений и обрастаний материалов, изделий и сооружений. М.: Наука, 1972. 213 с.
2. Горшина Е. С. Биоповреждения деревянных построек // Биоповреждения и биокоррозия в строительстве: материалы Междунар. науч.-техн. конференции. Саранск, 2004. 319 с.
3. Защита строительных материалов от биоповреждений / А. М. Кашников, А. В. Васильев, К. П. Каддо, Б. И. Штейман // Технологии строительства. 2011. № 6—7. С. 80—83.
4. Биоповреждения и биокоррозия в строительстве: материалы международной науч.-технич. конф. Саранск: Изд-во Мордовского университета, 2004. 358 с.
5. Фомичев В. Т., Камкова С. В., Филимонова Н. А. Повышение биостойкости строительных материалов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2012. Вып. 27(46). С. 34—38.
6. Разработка способов повышения биостойкости строительных материалов / Б. В. Гусев, В. Т. Ерофеев, В. Ф. Смирнов, А. В. Дергунова, А. Д. Богатов // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 4. С. 52—58.
7. Соломатов В. И., Селяев В. П. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов. М.: Стройиздат, 1987. 264 с.
8. Соломатов В. И., Черкасов В. Д., Ерофеев В. Т. Строительные биотехнологии и биокомпозиты. М.: Стройиздат, 1998. 166 с.
9. Румянцева Е. Е., Губернский Ю. Д., Кулакова Т. Ю. Экологическая безопасность строительных материалов, конструкций и изделий. М.: Университетская книга, 2005. 200 с.
10. Лугаускас А. Ю., Микульские А. И., Шляужене Д. Ю. Каталог микробиоты — биодеструкторов полимерных материалов. М.: Наука, 1987. 349 с.
11. Куликова И. А. Электролиз растворов минерала бишофита // Актуальные проблемы электрохимической технологии: сборник статей молодых ученых. Т. 1. Саратов.: ГАОУ ДПО «СарИПКИПРО», 2011. С. 252.
12. Фомичев В. Т., Куликова И. А., Камкова С. В. Электрохимический передел бишофита // Изучение и сохранение естественных ландшафтов: сб. статей международной науч.-практич. конф., 12—15 сентября 2011 г. М.: Планета, 2011. С. 417.
13. Акчурина Т. К., Ананьина С. А., Никитин И. И. Перспективы освоения и технологии переработки бишофита Волгоградских месторождений. Волгоград: ВолгГАСА, 1995. 116 с.
14. Салех Ахмед И. Ш. Волгоградский бишофит. Волгоград: Перемена, 2010. 432 с.
15. Камкова С. В. Разработка и обоснование использования препарата на основе минерала бишофит для решения экологической безопасности объектов строительства. Волгоград, 2013. 20 с.

© Камкова С. В., Куликова И. А., Фомичев В. Т., Филимонова Н. А., 2016

Поступила в редакцию  
в ноябре 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Экологическая оценка фунгицидных свойств биоцида на основе бишофита для защиты бетонов от биоповреждений / С. В. Камкова, И. А. Куликова, В. Т. Фомичев, Н. А. Филимонова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 77—85.

Об авторах:

**Камкова Светлана Витальевна** — канд. техн. наук, зам. директора по воспитательной работе, МОУ СОШ № 33 Дзержинского района г. Волгограда, bolshe\_sveta@mail.ru

**Куликова Ирина Александровна** — канд. техн. наук, доц., доцент кафедры общей и прикладной химии, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, artem8448@inbox.ru

**Фомичев Валерий Тарасович** — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой общей и прикладной химии, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

**Филимонова Наталья Алексеевна** — канд. техн. наук, доц., доцент кафедры химии, Волгоградский государственный аграрный университет. Российская Федерация, 400002, г. Волгоград, пр. Университетский, 26, [nata555552007@yandex.ru](mailto:nata555552007@yandex.ru)

**S. V. Kamkova, I. A. Kulikova, V. T. Fomichev, N. A. Filimonova**

## **ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF FUNGICIDAL PROPERTIES OF BIOCIDES BASED ON BISHOFITE FOR CONCRETE PROTECTION AGAINST BIOLOGICAL DAMAGE**

The authors present the study of the fungicidal properties of disinfectant-biocide obtained by electrolysis of bishofite solutions on steady current with zinc-anodes for concrete protection against biological damage.

**Key words:** biocide, bishofite, fungicides, biological damage.

### REFERENCES

1. Flerov B. K. [Biological damage of materials and products]. *Problemy biologicheskikh povrezhdenii i obrastanii materialov, izdelii i sooruzhenii* [Problems of biological damage and fouling of materials, products and constructions]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 213 p.
2. Gorshina E. S. [Biological damage of wooden constructions]. *Biopovrezhdeniya i biokorroziya v stroitel'stve: materialy Mezhdunar. nauch.-tekh. konf.* [Biological damage and corrosion in construction. Proc. Int. Sc.-Tech. Conf.]. Saransk, 2004. 319 p.
3. Kashnikov A. M., Vasil'ev A. V., Kaddo K. P., Shteiman B. I. [Protection of construction materials against biological damage]. *Tekhnologii stroitel'stva* [Technology of construction], 2011. no. 6 — 7, pp. 80—83.
4. *Biopovrezhdeniya i biokorroziya v stroitel'stve: materialy mezhdunarodnoi nauch.-tekhich. konf.* [Biological damage and corrosion in construction. Proc. of Int. Sc.-Tech. Conf.]. Saransk, Publishing house of Mordovian University, 2004. 358 p.
5. Fomichev V. T., Kamkova S. V., Filimonova N. A. [Increase of bioproofness of construction materials]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2012, iss. 27(46), pp. 34—38.
6. Gusev V., Erofeev V. T., Smirnov V. F., Dergunova A. V., Bogatov A. D. [Working Out Of Ways Of Increase Of Biofirmness Of Building Materials]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2012, no. 4, pp. 52—58.
7. Solomatov V. I., Selyaev V. P. *Khimicheskoe soprotivlenie kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov* [Chemical resistance of composite construction materials]. Moscow, Stroizdat Publ., 1987. 264 p.
8. Solomatov V. I., Cherkasov V. D., Erofeev V. T. *Stroitel'nye biotekhnologii i biokompozity* [Construction biotechnologies and biocomposites]. Moscow, Stroizdat Publ., 1998. 166 p.
9. Rumyantseva E. E., Gubernskii Yu. D., Kulakova T. Yu. *Ekologicheskaya bezopasnost' stroitel'nykh materialov, konstruksii i izdelii* [Environmental safety of construction materials, structures and products]. Moscow, Universitetskaya Kniga Publ., 2005. 200 p.
10. Lugauskas A. Yu., Mikul'skine A. I., Shlyauzhene D. Yu. *Katalog mikromitsetov — biodestruktorov polimernykh materialov* [Catalog of micromycetes — biodestructors of polymeric materials]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 349 p.
11. Kulikova I. A. [Electrolysis of bishofite mineral solutions]. *Aktual'nye problemy elektrokhimicheskoi tekhnologii: sbornik statei molodykh uchenykh. T. 1.* [Current problems of electrochemical technology: collection of articles by young scientists. Vol. 1.]. Saratov, GAOU DPO «SarIPKiPRO», 2011. P. 252.
12. Fomichev V. T., Kulikova I. A., Kamkova S. V. [Electrochemical processing of bishofite]. *Izuchenie i sokhranenie estestvennykh landshaftov: sb. statei mezhdunarodnoi nauch.-praktich. konf., 12—15 sentyabrya 2011 g.* [Research and preservation of natural landscapes. Proc. of the Int. Sc.-Prac. Conf., September 12—15, 2011]. Moscow, Planeta Publ., 2011. p. 417.

13. Akchurin T. K., Anan'ina S. A., Nikitin I. I. *Perspektivy osvoeniya i tekhnologii pererabotki bishofita Volgogradskikh mestorozhdenii* [Prospects of development and technology of processing of bishofite in the Volgograd fields]. Volgograd, VSAACE Publ., 1995. 116 p.

14. Salekh Akhmed I. Sh. *Volgogradskii bishofit* [Volgograd bischofite]. Volgograd, Peremena Publ., 2010. 432 p.

15. Kamkova S. V. *Razrabotka i obosnovanie ispol'zovaniya preparata na osnove minerala bishofit dlya resheniya ekologicheskoi bezopasnosti ob'ektov stroitel'stva* [Development and justification of use of a product based on mineral bishofite for the solution of problems of environmental safety of construction objects]. Volgograd, 2013. 20 p.

*For citation:*

Kamkova S. V., Kulikova I. A., Fomichev V. T., Filimonova N. A. [Environmental assessment of fungicidal properties of biocide based on bishofite for concrete protection against biological damage]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 77—85.

*About authors:*

**Kamkova Svetlana Vital'evna** — Candidate of Engineering Science, school no. 33 of Volgograd, bolshe\_sveta@mail.ru

**Kulikova Irina Aleksandrovna** — Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of General and Applied Chemistry Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [artem8448@inbox.ru](mailto:artem8448@inbox.ru)

**Fomichev Valerii Tarasovich** — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of General and Applied Chemistry Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

**Filimonova Natal'ya Alekseevna** — Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Chemistry Department, Volgograd State Agricultural University. 26, Prospekt Universitetskii, Volgograd, 400002, Russian Federation, [nata55552007@yandex.ru](mailto:nata55552007@yandex.ru)

УДК 691.332

**Ю. Д. Козлов, О. П. Сидельникова**

*Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

## **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ**

Изложены технологические принципы производства бетоно-полимерных, радиационно-модифицированных и гипсополимерных материалов. Технологические этапы заключаются в изготовлении обычным традиционным способом изделий из бетона, гипса или волокнистых листов из отходов растительного происхождения (измельченных) и отпрессованных, которые укладываются в герметичную емкость (радиационный аппарат), вакуумируются, пропитываются метилметакрилатом и облучаются на гамма-установке. Отделочные плиты изготавливаются из отходов полимерных изделий (бутылок, банок, посуды розового пользования), на которые накладываются бумажные рисунки. Далее на поверхность наливается тонкий слой лака и отверждается под пуском ускоренных элементов. Изделия подаются на склад готовой продукции.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** радиационно-модифицированные бетоны, гипсополимерные плиты (искусственный мрамор), волокнистые модифицированные листы, отделочные плиты с рисунками, сушка, пропитка, облучение гамма-квантами, ускоренными электронами, метилметакрилат, лак, вакуумирование, облучение.

Международная обстановка, сложившаяся структура экономики и курс на ускоренное восстановление и рост в машиностроении, строительстве, сельском хозяйстве требуют пересмотра принципов и особого внимания к построению инновационной экономики, а также модернизации промышленного производства, жизненно важных для РФ экономических реформ, основанных на рационализации, модернизации и инновациях.

Рацпредложение и модернизация — это совершенствование известных процессов и механизмов для формирования производственной и научно-практической среды в процессе творческой деятельности.

Инновации, связанные с открытием неизученных явлений и новых закономерностей, обладают бесспорной ценностью.

Для оценки и принятия решения по инновационным проектам создана независимая структура, состоящая из специалистов-изобретателей, имеющих достаточный творческий опыт.

Инновационная политика, на наш взгляд, должна включать:

объединение изобретателей и рационализаторов (ОИР), которое бы являлось инструментарием в поиске объективной оценки и выработки предложений по реализации проекта;

создание научно-производственной базы для научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) по каждому изобретению.

В связи с вышеизложенным нами предлагаются разработанные, испытанные и оформленные изобретения для реализации в производстве новых материалов (радиационно-модифицированных волокнистых плит — РМВП, бетоно-полимерных материалов — БПМ, радиационно-модифицированных гипсо-полимерных материалов — РМГПМ и композиционных отделочных плиток с любым цветным рисунком) [1—3].

Предлагаемые материалы имеют высокие физико-химические и эксплуатационно-экономические показатели (табл.).

Физические, эксплуатационные и экономические показатели предлагаемых материалов [1]

Материал	Годовая производительность, тыс. м <sup>2</sup>	Сырье	Ориентир. себестоимость, руб./м <sup>2</sup>	Размер плит, мм	Привес мономера, %	Предел прочности при сжатии, изгибе, МПа	Водопоглощение за 24 ч., %	Морозостойкость, циклы	Степень истираемости, г/см <sup>2</sup>
РМВП	200...300	Макулатура, отходы растительные, азот, инертный газ, вода, скоп, метилмета-крилат (ММА)	130...140	2500×1200×4...20	30...40	30...70	6	200	0,11
БПМ	200...300	Бетон, ММА, инертный газ	200...300	2400×1200×10...50	3...9	100...200; 20...30	0	5000	—
РМГПМ (искусственный мрамор)	150...200	Гипс, песок, краситель, вода, ММА, инертный газ	180...200	600×400×5...10	12...14	65...100; 15...30	0,9...0,12	200	(5-7)·10 <sup>-4</sup>
Композиционные отделочные плитки с рисунками, лаковым покрытием	1200...1500	Отходы термoplastа, песок, бумага, полиэфирный лак ПЭ-284, азот, пигменты	140...160	350...600×250...300×3...5	—	— 50...70	0	—	—

РМВП производят из биомассы растительного происхождения (опилки, листва, макулатура, стружки, биомасса хлопчатника, льна, конопли, подсолнечника, сахарного тростника, камыша и др.) [2—6].

Отходы измельчаются до 3...5 мм, подаются в массбассейн, где барботируются, перемешиваются с красителями и подаются в отливочную машину; смесь обезвоживается и транспортируется конвейером в многоэтажный пресс. Пресс одновременно прессует 20 плит размером 2500×1200 мм, толщина плит 4...20 мм. После прессования плиты обрезаются в заданный размер; они обладают достаточно прочными характеристиками (табл.).

Далее плиты сушатся и укладываются в кассеты и отправляются в радиационный аппарат (РА), представляющий собой герметичную емкость, имеющую выход для вакуумирования, подачи инертного газа и винилового мономера. Заполненные РА подаются на гамма-установку, где облучаются гамма-квантами. РМВП могут применяться для покрытия полов жилых, производственных и животноводческих помещений (отходы животных не влияют на прочность плит) [6].

Себестоимость РМВП при толщине 5 мм и производительности 200 тыс. м<sup>2</sup>/г. составляет около 130 руб./м<sup>2</sup> [1].

БПМ характеризуются структурой, которая обусловлена основой цементного камня и заполнителей. В теле камня имеются многочисленные поры. Для повышения свойств бетона улучшают его структуру (увеличивают плотность и уменьшают пористость) за счет заполнения пор [1, 7]. Радиационный способ получения БПМ способствует приданию им более высоких (на 7...15 %) физико-механических свойств. Прочностные показатели БПМ зависят от марок исходного бетона [1]. При марке исходного 200...250; 250...350; 350...450; 450...600 марка получаемого бетона БПМ будет равна соответственно 800, 1000, 1200, 1400.

Технология производства БПМ сводится к следующим операциям: изготовление бетонных изделий по обычной технологии, сушка, загрузка изделий в РА, герметизация РА, вакуумирование, пропитка изделий мономером в РА, облучение изделий на гамма-установке.

РМГПМ могут занимать одно из ведущих мест в строительной индустрии. Это обусловлено большими запасами гипсового природного сырья в РФ и его низкой стоимостью [1, 2, 7].

Технологический процесс производства РМГПМ (мраморовидных облицовочных плит) состоит из двух стадий: изготовление исходной гипсовой плиты методом прессования и радиационного модифицирования. Технология производства предусматривает применение в качестве дополнительного компонента — фосфогипса (добавки). Пропитка плит и облучение производится аналогично выше изложенному методу.

При активности гамма-установки 150 тыс. Ки производительность плит толщиной 4...20 мм составит более 300 тыс. м<sup>2</sup>/г. В гамма-установке используются изотопы <sup>60</sup>Co, <sup>90</sup>Sr или <sup>137</sup>Cs, выпускаемые в РФ.

Существующий технологический процесс производства керамических плиток весьма энергоемкий, не всегда имеется возможность расширить существующее производство или организовать новое. Последнее связано с тем, что не во всех регионах страны имеются необходимые сырьевые материалы и достаточное количество энергоресурсов для высокотемпературного обжига и глазурирования плитки.

Альтернативным вариантом отделочным обжиговым керамическим плиткам предлагаются безобжиговые плитки на основе неорганических наполнителей и органических вяжущих, например полимерные, где сама плитка изготавливается из смеси полимерных вяжущих и неорганического наполнителя, а покрытие — из бумаги и полимерного лакового слоя [8], причем под лаковый слой можно поместить нарисованный на бумаге рисунок и получить декоративные многоцветные отделочные плитки [1, 2, 6].

В качестве полимерного связующего применяют термопластичные или термореактивные полимеры (использованные бутылки, емкости), а для лакового покрытия — лаки радиационного отверждения.

Технология изготовления состоит из измельчения отходов полимеров, нагрева, сушки, перемешивания компонентов и превращения в гранулы. Гранулы передаются в формующее устройство, на поверхность плиты накладывается бумага с рисунком и охлаждается; затем плитки подаются на линию, на них наливается 50...100 мкм полимерного лака, далее — под пучок электронного потока ускорителя, где за 15...30 с лак отверждается, после чего плитка подается на склад готовой продукции для упаковки.

Предлагаемые технологии дают значительную прибыль с периодом окупаемости капитальных затрат 0,6...0,9 г.

Идея бизнес-проекта основывается на организации первого в ЮФО многопрофильного радиационного производства, в формате «научно-производственное предприятие».

Основой производственной программы (ассортиментной политики) будут выступать новые для России (а в ряде случаев и мира) инновационные продукты:

- сверхпрочные бетонно-полимерные материалы (марка 1400);
- гипсо- и фосфогипсополимерные материалы;
- уникальная облицовочная плитка;
- волоконистые плиты.

Отличительной особенностью данных материалов является их сверхвысокие физико-механические и потребительские свойства.

Организуемое предприятие будет иметь ряд стратегических преимуществ:

- отличные потребительские качества материалов;
- широкий ассортимент и возможность быстрой переналадки производственной линии на выпуск требуемой маркетингом продукции;

предприятие будет являться единственным многопрофильным радиационным производством в ЮФО;

долгосрочный резерв конкурентоспособности вследствие применения энергоэкономных процессов (присуще всем радиационным производствам);

предлагаемая (радиационная) технология недоступна в среднесрочной перспективе (15...25 лет) для возможных конкурентов (непреодолимый барьер вхождения в отрасль) [1];

исполняющая бизнес-план организация станет безусловным монополистом в технологическом и в ассортиментном аспектах;

организуемое предприятие замкнет на себя все научно-прикладные разработки ЮФО в сфере радиационного материаловедения, радиационной химии, биорадиационных процессов и др;

предполагаемые технологии позволяют утилизировать различные проблемные отходы (фосфогипс, скоп и др.);

значимость проекта предопределяет получение налоговых и других преференций со стороны региональных и муниципальных властей и др.

Общая сумма необходимых для реализации проекта инвестиций составит не менее — 115 млн руб., которые предлагается профинансировать заинтересованным инвесторам. Декларируемая сумма инвестирования покрывает приобретение необходимых активов и часть операционных затрат и расходов.

Организуемый штатный персонал составит не менее 120 чел. Для реализации проекта привлекаются высококвалифицированные работники. При успешной реализации программы маркетинга будет увеличиваться объем производства и реализации, повышаться объем и качество предоставляемых дополнительных сервисных услуг; возможен экспорт технологий в другие регионы РФ, страны ближнего и дальнего зарубежья.

Сильной стороной предприятия является ориентация на расширяющиеся (в объективных прогнозах) сегменты стабильно растущих рынков (в региональном, национальном, мировом аспекте). Бизнес-проект имеет конкурентное преимущество высокого рода (уникальность предлагаемой продукции по сверхвысоким физико-механическим и потребительским свойствам, полная экологическая и радиационная безопасность)<sup>1</sup> [9], обладает структурой (сочетание элементов бизнеса), приспособленной для реализации поставленной цели.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козлов Ю. Д., Стефаненко И. В., Ермолаев С. В. Высокие технологии с использованием источников ионизирующих излучений в промышленности: учебное пособие. М.: Энергоатомиздат, 2006. 714 с.
2. Козлов Ю. Д., Путилов А. В. Основы радиационной технологии в производстве строительных материалов: учебное пособие. М.: Руда и металлы, 2001. 334 с.
3. Стефаненко И. В. Высокие технологии в экологии и при переработке отходов в эффективные строительные материалы. Волгоград: Волгоградское научное издательство, 2005. 142 с.
4. Хрулев В. Т. Модифицированная древесина в строительстве. М.: Стройиздат, 1986. 112 с.
5. Делацис Я. А. Радиационно-химическое модифицирование древесины. Рига: Зинанте, 1985. 218 с.
6. Малый В. Т., Черный А. Я. Полы производственных сельскохозяйственных зданий. Киев: Будівельник, 1983. 64 с.
7. Гроценко А. А., Черкашин Г. В. Радиационно-модифицированные изделия с использованием ферогипса // Энергосберегающие технологии, эффективные строительные материалы и конструкции для промышленного и гражданского строительства. Днепропетровск: ДИСН, 1989. С. 13.
8. Ширяев Г. В., Козлов Ю. Д. Технология радиационного отверждения покрытий. М.: Атомиздат, 1980. 71 с.
9. Сидельникова О. П. Радиационный контроль в строительной индустрии. М.: Изд. АСВ, 2002. 208 с.

© Козлов Ю. Д., Сидельникова О. П., 2016

Поступила в редакцию  
в январе 2016 г.

<sup>1</sup> Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) и гигиенические нормативы. М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 2009.

**Ссылка для цитирования:**

Козлов Ю. Д., Сидельникова О. П. Перспективные технологии строительных материалов для строительной индустрии // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 86—92.

**Об авторах:**

**Козлов Юрий Дмитриевич** — д-р техн. наук, профессор, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

**Сидельникова Ольга Петровна** — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности в техносфере, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, sidelnikova-volg@mail.ru

**Yu. D. Kozlov, O. P. Sidel'nikova**

## PROMISING TECHNOLOGIES OF BUILDING MATERIALS FOR CONSTRUCTION INDUSTRY

The technological principles of the production of concrete-polymer, radiation-modified and gipsopolimere materials are stated. Technological steps involve manufacturing of articles of concrete, plaster or fiber sheets from phytogenic waste that is compacted. These articles are placed in a hermetic container (radiation unit), where they are vacuumized and impregnated with methyl methacrylate and gamma-irradiated. Finishing boards are made from polymer wastes (bottles, cans, disposable utensils), on which paper drawings are put. Later, a thin layer of lacquer is poured on the surface, then it is hardened under the start of accelerated elements. The products are supplied to the finished goods warehouse.

**Key words:** radiation-modified concrete, gipsopolimere boards (artificial marble), fiber-modified sheets, finishing boards with drawings, drying, impregnation, irradiation by gamma rays, accelerated electrons, methyl methacrylate, lacquer, vacuumization, radiation.

### REFERENCES

1. Kozlov Yu. D., Stefanenko I. V., Ermolaev S. V. *Vysokie tekhnologii s ispol'zovaniem istochnikov ioniziruyushchikh izlucheni v promyshlennosti: uchebnoe posobie* [High technologies with the use of sources of ionizing radiation in the industry. Manual]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2006. 714 p.
2. Kozlov Yu. D., Putilov A. V. *Osnovy radiatsionnoi tekhnologii v proizvodstve stroitel'nykh materialov: uchebnoe posobie* [Principals of radiation technology in production of construction materials. Manual]. Moscow, Ruda i Metally Publ., 2001. 334 p.
3. Stefanenko I. V. *Vysokie tekhnologii v ekologii i pri pererabotke otkhodov v effektivnye stroitel'nye materialy* [High technologies in ecology and at recycling of wastes into effective construction materials]. Volgograd, Volgogradskoe Nauchnoe Izdatel'stvo, 2005. 142 p.
4. Khrulev V. T. *Modifitsirovannaya drevesina v stroitel'stve* [Modified wood in construction]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1986. 112 p.
5. Delatsis Ya. A. *Radiatsionno-khimicheskoe modifitsirovanie drevesiny* [Radiochemical modifying of wood]. Riga, Zinante Publ., 1985. 218 p.
6. Maliy V. T., Chernyi A. Ya. *Poly proizvodstvennykh sel'skokhozyaistvennykh zdanii* [Floors of industrial agricultural buildings]. Kiev, Budivel'nik Publ., 1983. 64 p.
7. Grotsenko A. A., Cherkashin G. V. [Radiation modified products with the use of ferro gypsum]. *Energoberegayushchie tekhnologii, effektivnye stroitel'nye materialy i konstruktсии dlya promyshlennogo i grazhdanskogo stroitel'stva* [Energy efficient technologies, effective construction materials and structures for industrial and civil engineering]. Dnepropetrovsk, DISN Publ., 1989. P. 13.

8. Shiryaev G. V., Kozlov Yu. D. *Tekhnologiya radiatsionnogo otverzheniya pokrytii* [Technology of radiation cure of coverings]. Moscow, Atomizdat Publ., 1980. 71 p.

9. Sidel'nikova O. P. *Radiatsionnyi kontrol' v stroitel'noi industrii* [Radiation control in construction industry]. Moscow, ASV Publishing House, 2002. 208 p.

*For citation:*

Kozlov Yu. D., Sidel'nikova O. P. [Promising technologies of building materials for construction industry]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 86—92.

*About authors:*

**Kozlov Yurii Dmitrievich** — Doctor of Engineering Science, Professor, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

**Sidel'nikova Ol'ga Petrovna** — Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of Life Safety in Technosphere Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [sidelnikova-volg@mail.ru](mailto:sidelnikova-volg@mail.ru)

УДК 691.32:620.191.33

**В. А. Перфилов, А. В. Котляревская, У. В. Канавец**

*Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

## **ВЛИЯНИЕ ПОЛЫХ СТЕКЛЯННЫХ МИКРОСФЕР НА СВОЙСТВА ЛЕГКИХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ**

Представлены результаты экспериментальных исследований по определению влияния полых стеклянных микросфер на свойства легких мелкозернистых бетонов.

**Ключевые слова:** стеклянные микросферы, суперпластификаторы, пенобетоны, прочность, плотность.

В настоящее время в строительстве большое значение приобретает применение железобетонных изделий с небольшой массой при сохранении заданных прочностных характеристик. Поэтому возрастает интерес к использованию легких теплоизоляционных элементов ограждающих конструкций, обладающих необходимой прочностью, высокой трещиностойкостью и долговечностью [1—7].

Таким образом, целью научных исследований является увеличение прочности пенофибробетона при относительно невысокой плотности. Снизить плотность пенофибробетона, при этом увеличив прочностные характеристики и трещиностойкость на микроуровне, удалось при помощи введения в него аппретированных полых стеклянных микросфер марки МС-ВП-А9\*, изготовленных по ТУ 6-48-91—92 в ОАО «НПО Стеклопластик».

Полые стеклянные микросферы представляют собой белый сыпучий порошок, состоящий из крошечных тонкостенных шариков диаметром 20...160 мкм и толщиной стенки менее 2 мкм.

Состав стекла и почти правильная сферическая форма микросфер обеспечивают их очень высокую прочность при сжатии, низкое водопоглощение, малую теплопроводность, высокую химическую стойкость и радиопрозрачность.

Рассматривались разные концентрации полых стеклянных микросфер, как в сочетании с песком, так и в чистом виде, т. е. полная его замена.

Все серии образцов изготавливались с применением цемента ЗАО «Осколцемент» марки ЦЕМ I 42,5 Н (ПЩ М500 Д0), песка ЗАО «Орловский песчаный карьер» с модулем крупности 1,91, полипропиленовой фибры (ВСМ) или базальтовой фибры, а также с использованием одного из пенообразователей, либо пожарной пены общего назначения «ПО-6», либо пенообразователя «ПБ-2000».

В табл. 1 представлены результаты исследования влияния полых стеклянных микросфер на физико-механические свойства пенофибробетона с полипропиленовой фиброй, пожарной пеной общего назначения «ПО-6» и суперпластификатором Sika ViscoCrete 5-800.

Проведенные испытания показали, что применение полых стеклянных микросфер приводит к повышению прочности на сжатие по сравнению с со-

ставом смеси, в которой присутствует только песок. Наибольшую прочность на сжатие имеет состав, в котором концентрация песка и полых стеклянных микросфер одинаковая, т. е. составляет 50 %. Увеличение прочности на сжатие составляет 16,4 %, а на изгиб — 23 %.

Таблица 1

*Влияние полых стеклянных микросфер на свойства пенофибробетонов с пенообразователем «ПО-6», суперпластификатором Sika ViscoCrete 5-800 и полипропиленовой фиброй*

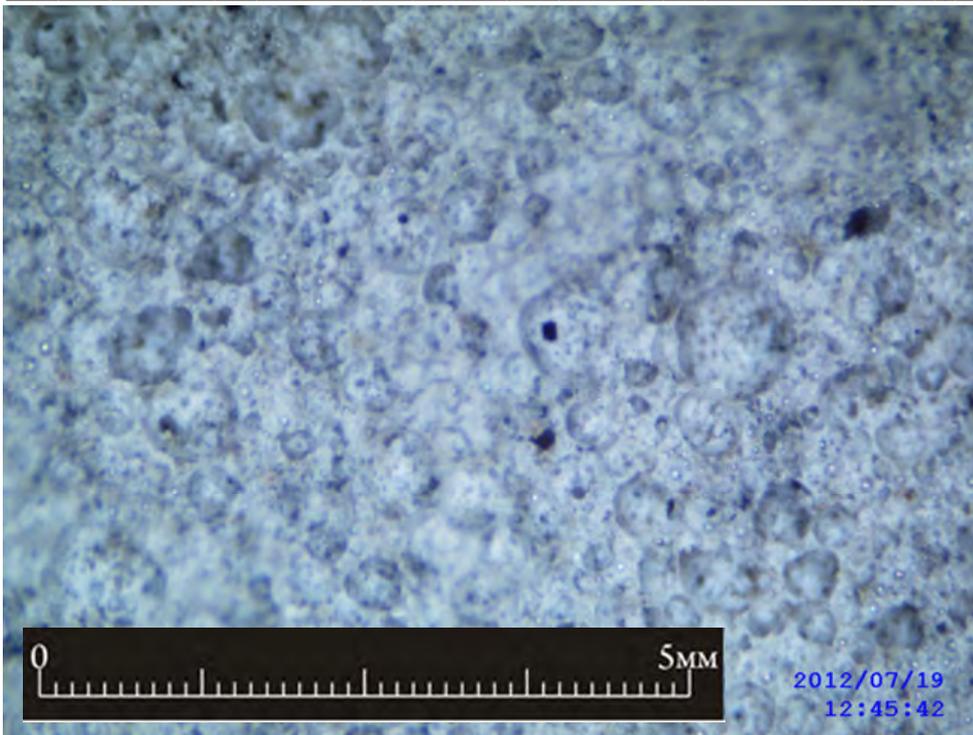
Процентное содержание песка П и сфер С, %	Количество песка, г	Количество стеклянных сфер, г	Количество воды, мл	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность пенофибробетона, МПа	
					на изгиб	на сжатие
Эталон (песок 100 %)	240	—	210	698,67	3,13	4,50
Сферы, 100 %	—	48	270	529,67	3,43	4,53
<b>П × С = 50 × 50</b>	<b>120</b>	<b>24</b>	<b>240</b>	<b>534,33</b>	<b>3,85</b>	<b>5,24</b>
П × С = 75 × 25	180	12	220	574,00	3,55	4,67
П × С = 25 × 75	60	36	255	594,67	3,58	4,83

Изучение микроструктуры пенофибробетонных образцов с пластифицирующими добавками и полыми стеклянными микросферами, а также образцов, содержащих разные концентрации песка, проводилось с помощью цифрового стереомикроскопа «Альтами LCD». Микроструктура пенофибробетона с разной степенью увеличения представлена на рис. 1. При введении в пенобетонную смесь аппретированных полых стеклянных микросфер марки МС-ВП-А9\* происходит их равномерное распределение по объему смеси и формирование однородной структуры, за счет чего повышается прочность и трещиностойкость, а также улучшается сцепление с цементной матрицей.

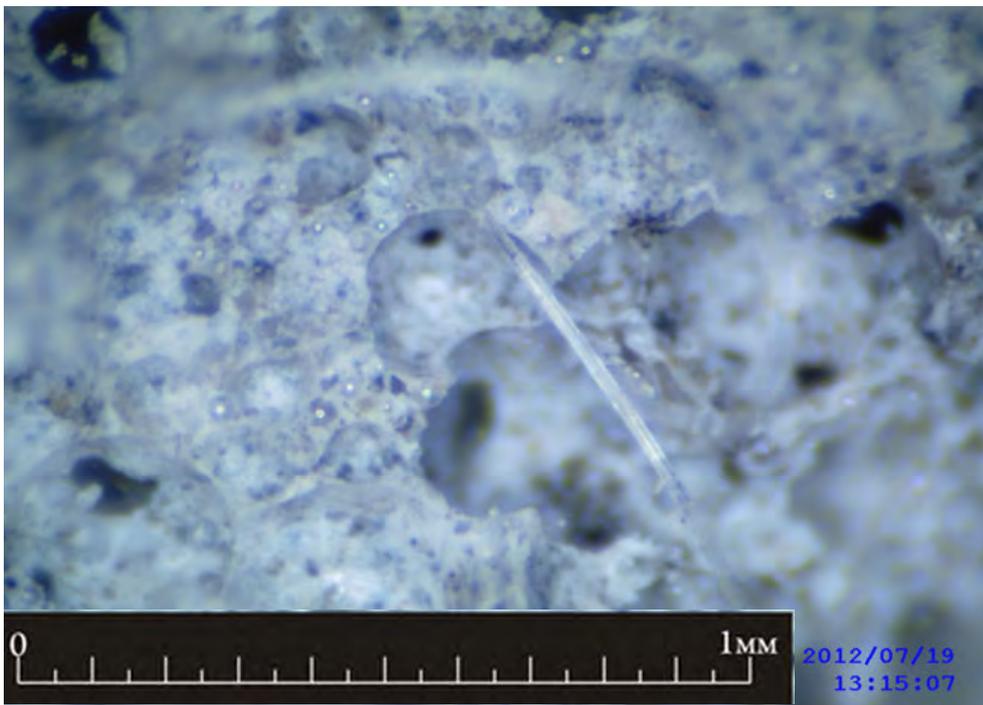
Увеличение прочности и трещиностойкости пенофибробетона связано с тем, что возникающая в процессе действия механической нагрузки локальная трещина постоянно встречает на своем пути полые стеклянные микросферы, обладающие достаточно высокой прочностью, а также фибровые волокна (см. рис. 1), скрепляющие цементную матрицу.

При проведении научных исследований были получены новые составы пенофибробетона с улучшенными физико-механическими свойствами в результате упрочнения на микро- и наноуровне.

В дальнейших экспериментальных исследованиях проведены испытания образцов с суперпластификатором Sika ViscoCrete 5-800, на полипропиленовой фибре, с использованием полых стеклянных микросфер и пенообразователя «ПБ-2000». Результаты исследования влияния стеклянных микросфер на свойства пенофибробетона с полипропиленовой фиброй, пенообразователем «ПБ-2000» и суперпластификатором Sika ViscoCrete 5-800 представлены в табл. 2.



*a*



*b*

Рис. 1. Микрофотография структуры образца, содержащего 50 % полых стеклянных микросфер и 50 % песка: *a* — 50-кратное увеличение; *b* — 120-кратное увеличение

Таблица 2

*Влияние полых стеклянных микросфер на свойства пенофибробетонов с пенообразователем «ПБ-2000», суперпластификатором «Sika ViscoCrete 5-800» и полипропиленовой фиброй*

Процентное содержание песка П и сфер С, %	Количество песка, г	Количество полых стеклянных сфер, г	Количество воды, мл	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность пенофибробетона, МПа	
					на изгиб	на сжатие
Эталон (песок 100 %)	240	—	210	598,67	2,96	4,18
<b>Сферы, 100 %</b>	—	<b>48</b>	<b>270</b>	<b>527,33</b>	<b>3,65</b>	<b>5,37</b>
П × С = 50 × 50	120	24	240	573,67	3,21	4,73
П × С = 75 × 25	180	12	225	583,33	3,41	4,49
П × С = 25 × 75	60	36	255	528,33	3,59	4,43

Анализ полученных данных указывает на повышение прочности в результате применения полых стеклянных микросфер и суперпластифицирующей добавки Sika ViscoCrete 5-800. При наибольшей концентрации полых стеклянных микросфер, составляющей 100 %, т. е. без применения песка, получена максимальная прочность при сжатии и она больше, чем в эталонных образцах, где сферы отсутствуют, на 28,5 %, а увеличение прочности при изгибе составило 23,3 %.

В дальнейших экспериментальных исследованиях проведены испытания образцов с суперпластификатором «ПОЛИПЛАСТ СП-4», полипропиленовой фиброй и полыми стеклянными микросферами, пенообразователем «ПО-6». Результаты исследования представлены в табл. 3.

Таблица 3

*Влияние полых стеклянных микросфер на свойства пенофибробетонов с пенообразователем «ПО-6», суперпластификатором «ПОЛИПЛАСТ СП-4» и полипропиленовой фиброй*

Процентное содержание песка П и сфер С, %	Количество песка, г	Количество стеклянных сфер, г	Количество воды, мл	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность пенофибробетона, МПа	
					на изгиб	на сжатие
Эталон (песок 100 %)	240	—	210	688,43	2,80	4,47
<b>Сферы, 100 %</b>	—	<b>48</b>	<b>270</b>	<b>596,50</b>	<b>3,81</b>	<b>5,95</b>
П × С = 50 × 50	120	24	240	580,33	3,79	5,17
П × С = 75 × 25	180	12	220	670,67	3,14	4,72
П × С = 25 × 75	60	36	265	602,67	3,62	5,18

Проведенные испытания показали, что наибольшую прочность на сжатие имеет состав, в котором присутствуют полые стеклянные микросферы в 100 % концентрации, т. е. без добавления песка. Прочность увеличилась 33,1 % по сравнению с эталоном, а повышение прочности при изгибе составило 36 %.

В дальнейших экспериментальных исследованиях проведены испытания образцов с суперпластификатором «ПОЛИПЛАСТ СП-4», использованием полипропиленовой фибры и полых стеклянных микросфер, пенообразователем «ПБ-2000». Результаты исследования представлены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

*Влияние полых стеклянных микросфер на свойства пенофибробетонов с пенообразователем «ПБ-2000», суперпластификатором «ПОЛИПЛАСТ СП-4» и полипропиленовой фиброй*

Процентное содержание песка П и сфер С, %	Количество песка, г	Количество стеклянных сфер, г	Количество воды, мл	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность пенофибробетона, МПа	
					на изгиб	на сжатие
Эталон (песок 100 %)	240	—	210	454,00	3,85	4,12
<b>Сферы, 100 %</b>	—	48	270	337,33	3,78	4,49
<b>П × С = 50 × 50</b>	<b>120</b>	<b>24</b>	<b>240</b>	<b>385,00</b>	<b>4,13</b>	<b>5,43</b>
П × С = 75 × 25	180	12	220	489,67	3,87	5,27
П × С = 25 × 75	60	36	255	498,67	4,07	5,00

Анализ полученных данных указывает на повышение прочности при сжатии в результате применения полых стеклянных микросфер и суперпластифицирующей добавки «ПОЛИПЛАСТ СП-4». Максимальная прочность при сжатии получена в образцах, где соотношение песка и полых стеклянных микросфер составляет по 50 % и она больше, чем в эталонных образцах, где сферы отсутствуют, на 31,8 %. Прочность на изгиб увеличилась незначительно — на 7,3 %.

В процессе проведения последующих экспериментальных исследований используется вышеуказанный состав пенофибробетонной смеси с базальтовой фиброй, суперпластификатором Sika ViscoCrete 5-800 и пенообразователем «ПО-6».

Данные, полученные в ходе экспериментальных исследований, представлены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

*Влияние полых стеклянных микросфер на свойства пенофибробетонов с пенообразователем «ПО-6» и суперпластификатором «Sika ViscoCrete 5-800» и базальтовой фиброй*

Процентное содержание песка П и сфер С, %	Количество песка, гр	Количество стеклянных сфер, гр	Количество воды, мл	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность пенофибробетона, МПа	
					на изгиб	на сжатие
Эталон (песок 100 %)	240	—	210	614,67	3,29	4,38
<b>Сферы, 100 %</b>	—	<b>48</b>	<b>275</b>	<b>578,00</b>	<b>3,99</b>	<b>5,86</b>
П × С = 50 × 50	120	24	240	434,67	3,61	5,17
П × С = 75 × 25	180	12	220	553,67	3,78	5,26
П × С = 25 × 75	60	36	255	481,67	3,97	5,54

Проведенные испытания показали, что наибольшую прочность на сжатие имеет состав, в котором присутствуют полые стеклянные микросферы в 100 % концентрации.

Прочность увеличилась на 33,8 % по сравнению с эталоном, где сферы отсутствуют. Прочность на изгиб возросла на 21,3 %.

В дальнейших экспериментальных исследованиях проведены испытания образцов с суперпластификатором Sika ViscoCrete 5-800, с применением базальтовой фибры, полых стеклянных микросфер и пенообразователя «ПБ-2000».

Результаты испытаний представлены в табл. 6.

Таблица 6

*Влияние полых стеклянных микросфер на свойства пенофибробетонов с пенообразователем «ПБ-2000» и суперпластификатором «Sika ViscoCrete 5-800» и базальтовой фиброй*

Процентное содержание песка П и сфер С, %	Количество песка, г	Количество стеклянных сфер, г	Количество воды, мл	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность пенофибробетона, МПа	
					на изгиб	на сжатие
Эталон (песок 100 %)	240	—	215	458,33	3,11	4,27
<b>Сферы, 100 %</b>	—	<b>48</b>	<b>270</b>	<b>455,67</b>	<b>3,94</b>	<b>5,66</b>
П × С = 50 × 50	120	24	240	539,00	3,25	4,55
П × С = 75 × 25	180	12	225	563,67	4,56	4,63
П × С = 25 × 75	60	36	255	455,67	3,38	4,39

Анализ полученных данных указывает на повышение прочности при сжатии в результате применения полых стеклянных микросфер и суперпластифицирующей добавки Sika ViscoCrete 5-800. Максимальная прочность при сжатии получена в образцах, где полые стеклянные микросферы полностью заменяют песок, и она увеличилась на 32,5 %, по сравнению с эталоном. Прочность на изгиб возросла на 26,7 %. На рис. 2 представлена микрофотография структуры вышеуказанного образца.

Наличие большого количества полых стеклянных микросфер способствовало получению структуры пенофибробетона, включающей открытые воздушные поры в результате применения пенообразователя, а также замкнутые поры при использовании достаточно прочных микросфер. Промежуточное пространство между указанными воздушными прослойками скреплено достаточно прочными базальтоармированными перегородками цементной матрицы.

Далее рассматривались составы с применением базальтовой фибры, суперпластификатором «ПОЛИПЛАСТ СП-4» и пенообразователем «ПО-6».

Результаты испытаний представлены в табл. 7.

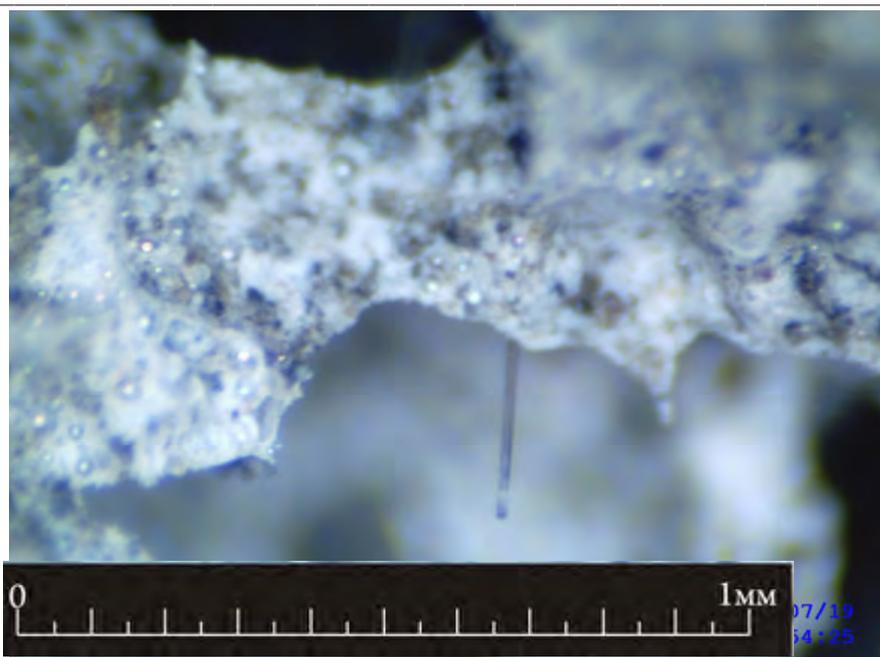


Рис. 2. Микрофотография структуры образца, содержащего 100 % полых стеклянных микросфер без применения песка, 120-кратное увеличение

Т а б л и ц а 7

*Влияние полых стеклянных микросфер на свойства пенофибробетонов с пенообразователем «ПО-6» и суперпластификатором «ПОЛИПЛАСТ СП-4» с использованием базальтовой фибры*

Процентное содержание песка П и сфер С, %	Количество песка, г	Количество стеклянных сфер, г	Количество воды, мл	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность пенофибробетона, МПа	
					на изгиб	на сжатие
Эталон (песок 100 %)	240	—	215	707,00	3,36	4,88
<b>Сферы, 100 %</b>	—	48	270	656,50	3,67	5,38
<b>П × С = 50 × 50</b>	<b>120</b>	<b>24</b>	<b>240</b>	<b>656,00</b>	<b>3,83</b>	<b>5,66</b>
П × С = 75 × 25	180	12	225	618,33	3,71	5,44
П × С = 25 × 75	60	36	255	699,50	3,73	5,29

Анализ полученных данных указывает на то, что максимальная прочность при сжатии получена в образцах, где соотношение песка и полых стеклянных микросфер составляет по 50 % и она больше, чем в эталонных образцах, где сферы отсутствуют, на 15,9 %. Прочность на изгиб возросла на 14 %.

В дальнейших экспериментальных исследованиях проведены испытания образцов с суперпластификатором «ПОЛИПЛАСТ СП-4», с применением базальтовой фибры, полых стеклянных микросфер и пенообразователя «ПБ-2000». Результаты испытаний представлены в табл. 8.

Таблица 8

*Влияние полых стеклянных микросфер на свойства пенофибробетонов с пенообразователем «ПБ-2000» и суперпластификатором «ПОЛИПЛАСТ СП-4» с использованием базальтовой фибры*

Процентное содержание песка П и сфер С, %	Количество песка, г	Количество стеклянных сфер, г	Количество воды, мл	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность пенофибробетона, МПа	
					на изгиб	на сжатие
Эталон (песок 100 %)	240	—	215	471,67	3,00	4,56
Сферы, 100 %	—	48	270	438,33	3,17	5,17
<b>П × С = 50 × 50</b>	<b>120</b>	<b>24</b>	<b>240</b>	<b>563,00</b>	<b>3,59</b>	<b>5,87</b>
П × С = 75 × 25	180	12	225	402,00	3,24	4,87
П × С = 25 × 75	60	36	255	299,67	3,20	5,22

Проведенные испытания показали, что максимальная прочность при сжатии получена в образцах, где соотношение песка и полых стеклянных микросфер составляет по 50 % и она больше, чем в эталонных образцах, где сферы отсутствуют, на 28,7 %. Прочность на изгиб возросла на 19,7 %. Влияние полых стеклянных микросфер на свойства пенофибробетонов с использованием подобранных суперпластификаторов, пенообразователей «ПО-6» и «ПБ-2000», а также полипропиленовых и базальтовых волокон представлено на рис. 3 и 4.

Исходя из данных, представленных на рис. 3 и 4, наглядно видно, что в результате проведенных экспериментов наиболее максимальная прочность с применением пенообразователей «ПО-6» и «ПБ-2000» наблюдалась в образцах, где содержание полых стеклянных микросфер составляет 50 % и 100 %.

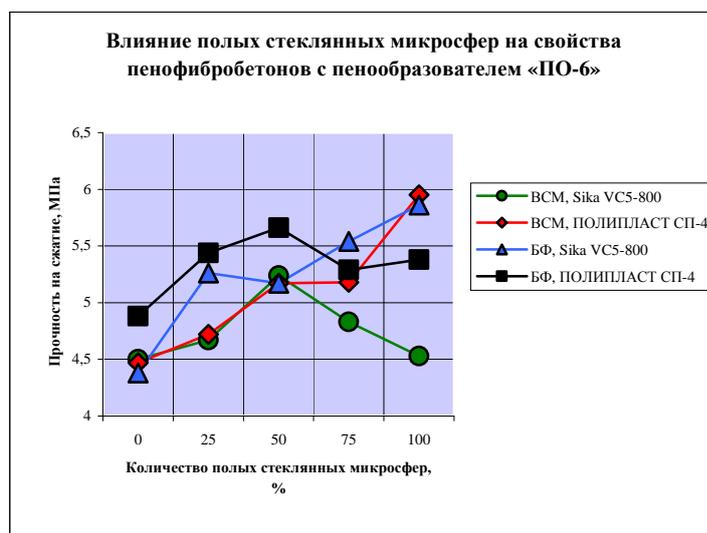


Рис. 3. Влияние полых стеклянных микросфер на свойства пенофибробетонов с использованием пенообразователя «ПО-6»

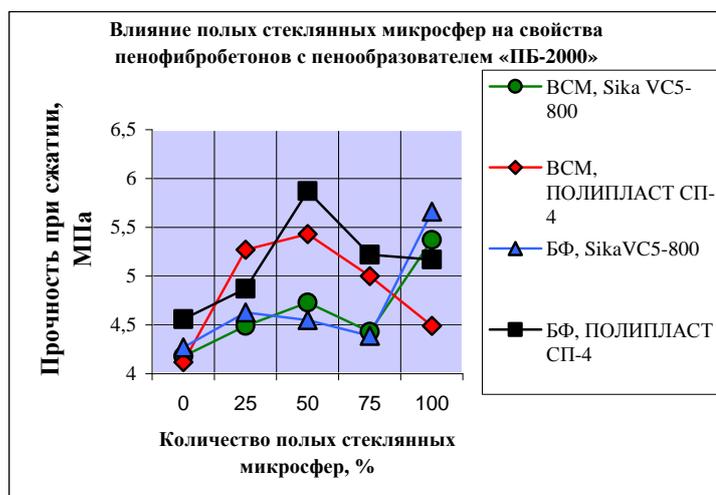


Рис. 4. Влияние полых стеклянных микросфер на свойства пенофибробетонов с использованием пенообразователя «ПБ-2000»

Таким образом, введение в пенофибробетонную смесь аппретированных полых стеклянных микросфер марки МС-ВП-А9\* способствовало повышению прочности и однородности смеси, а также некоторому снижению плотности пенофибробетона по отношению к составам без использования микросфер. Наилучшие результаты показали составы, в которых концентрация аппретированных полых стеклянных микросфер составляла 50 % и 100 %. Однако учитывая то, что микросферы являются достаточно дорогим микронаполнителем, цена которого приблизительно равна 300 р. за 1 кг, в дальнейших исследованиях микросферы применялись в количестве не более 50 %.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перфилов В. А., Аткина А. В., Кусмарцева О. А. Применение модифицирующих микроармирующих компонентов для повышения прочности ячеистых материалов // Известия вузов. Строительство. 2010. № 9. С. 11—14.
2. Перфилов В. А., Аткина А. В., Кусмарцева О. А. Фибробетоны с высокодисперсными волокнистыми наполнителями // Малоэтажное строительство : технологии и материалы, проблемы и перспективы развития в Волгоградской области : Международная науч.-практич. конф. в рамках Национального проекта «Доступное и комфортное жилье гражданам России». Волгоград : ВолГАСУ, 2009. С. 89—91.
3. Перфилов В. А., Котляревская А. В. Применение волокнистых наполнителей и суперпластификаторов для повышения прочности пенобетонов // Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов : 6 Международная конф. Волгоград : ВолГАСУ, 2011. С. 251—252.
4. Перфилов В. А., Котляревская А. В., Кусмарцева О. А. Сырьевая смесь для изготовления ячеистых материалов и способ ее приготовления : патент на изобретение № 2422408 ; бюл. № 18 от 27.06.2011.
5. Перфилов В. А., Лепилов В. И. Керамзитобетонный блок с высокими теплозащитными свойствами // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Сер.: Технические науки. 2008. № 6. С. 116—120.
6. Перфилов В. А., Лепилов В. И., Котляревская А. В. Пенофибробетонные блоки пониженной теплопроводности для ограждающих конструкций // Качество внутреннего воз-

духа и окружающей среды : 10-я Международная науч. конф. Волгоград: ВолгГАСУ, 2012. С. 439—444.

7. Котляревская А. В. Пенофибробетоны с применением микроупрочнителей и модифицирующих добавок: дис.. канд. техн. наук. Волгоград, 2013.

© Перфилов В. А., Котляревская А. В., Канавец У. В., 2016

Поступила в редакцию  
в сентябре 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Перфилов В. А., Котляревская А. В., Канавец У. В. Влияние полых стеклянных микросфер на свойства легких мелкозернистых бетонов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 93—103.

Об авторах:

**Перфилов Владимир Александрович** — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой морских нефтегазовых сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

**Котляревская Алена Валерьевна** — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [aleninok@rambler.ru](mailto:aleninok@rambler.ru)

**Канавец Ульяна Владимировна** — канд. техн. наук, доцент кафедры морских нефтегазовых сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [uliana2102@yandex.ru](mailto:uliana2102@yandex.ru)

**V. A. Perfilov, A. V. Kotlyarevskaya, U. V. Kanavets**

## THE INFLUENCE OF HOLLOW GLASS MICROSPHERES ON THE PROPERTIES OF LIGHT FINE-GRAINED CONCRETE

The article presents the results of experimental studies to determine the effect of hollow glass microspheres on the properties of light fine-grained concretes.

**Key words:** glass microspheres, superplasticizers, concrete, strength, density.

### REFERENCES

1. Perfilov V. A., Atkina A. V., Kusmartseva O. A. [Application of modifying micro-reinforcing components to increase strength of celled materials]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Construction], 2010, no. 9, pp. 11—14.
2. Perfilov V. A., Atkina A. V., Kusmartseva O. A. [Fiber concrete with finely dispersed fibrous fillers]. *Maloetazhnoe stroitel'stvo : tekhnologii i materialy, problemy i perspektivy razvitiya v Volgogradskoi oblasti : Mezhdunarodnaya nauch.-praktich. konf. v ramkakh Natsional'nogo proekta «Dostupnoe i komfortnoe zhil'e grazhdanam Rossii»* [Low-rise construction: technologies and materials, problems and prospects of development in Volgograd Oblast. Int. Sc.-Prac. Conf. within the National Project "Affordable and Comfortable Housing for the Citizens of Russia"]. Volgograd, VSUACE Publ., 2009. Pp. 89—91.
3. Perfilov V. A., Kotlyarevskaya A. V. [Use of fibrous fillers and superplasticizer to increase strength of foamed concrete]. *Nadezhnost' i dolgovechnost' stroitel'nykh materialov, konstruksii i osnovanii fundamentov : 6 Mezhdunarodnaya konf.* [Reliability and lifetime of construction materials, structures and bases of foundations. 6 Int. Conf.]. Volgograd, VSUACE Publ., 2011. Pp. 251—252.
4. Perfilov V. A., Kotlyarevskaya A. V., Kusmartseva O. A. *Syr'evaya smes' dlya izgotovleniya yacheistyykh materialov i sposob ee prigotovleniya* [Raw mix for production of celled materials and the method of its preparation. Pat. № 2422408. Russian Federation].
5. Perfilov V. A., Lepilov V. I. [Claydit block with high thermal properties]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki* [University news North-Caucasian Region. Technical sciences series], 2008, no. 6, pp. 116—120.

6. Perfilov V. A., Lepilov V. I., Kotlyarevskaya A. V. [Foamed fiber concrete blocks of reduced heat conductivity for building envelope]. *Kachestvo vnutrennego vozdukh i okruzhayushchei sredy : 10-ya Mezhdunarodnaya nauch. konf.* [Quality of inside air and the environment. 10th Int. Sc. Conf.]. Volgograd, VSUACE Publ., 2012. Pp. 439—444.

7. Kotlyarevskaya A. V. *Penofibrobetony s primeneniem mikrouprochnitelei i modifitsiruyushchikh dobavok* [Foamed fiber concrete with the use of micro-hardener and modifying additives. Diss. Cand. Eng. Sci.]. Volgograd, 2013.

*For citation:*

Perfilov V. A., Kotlyarevskaya A. V., Kanavets U. V. [The influence of hollow glass microspheres on the properties of light fine-grained concrete]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 93—103.

*About authors:*

**Perfilov Vladimir Aleksandrovich** — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Sea Oil and Gas Constructions Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

**Kotlyarevskaya Alena Valer'evna** — Candidate of Engineering Science, Senior Lecturer of Engineering Structures, Foundations and Safety of Constructions Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [aleninok@rambler.ru](mailto:aleninok@rambler.ru)

**Kanavets Ul'yana Vladimirovna** — Candidate of Engineering Science, Docent of Sea Oil and Gas Constructions Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [uliana2102@yandex.ru](mailto:uliana2102@yandex.ru)

УДК 691.542

**Е. А. Шошин, Ю. Г. Иващенко**

*Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕГИДРАТАЦИИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЦЕМЕНТНЫХ ГИДРОСИЛИКАТОВ МЕТОДОМ ИК-СПЕКТРОСКОПИИ**

Методом инфракрасной спектроскопии (ИК) исследован процесс дегидратации модифицированных цементных гидросиликатов. Обнаружено, что модифицирующий углевод мальтоза может входить в межслоевое пространство тоберморитовых гидросиликатов. Присутствие мальтозы приводит к появлению в ИК-спектре тоберморита новых полос поглощения, характер и расположение которых определяется условиями дегидратации.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** портландцемент, мальтоза, помол, модифицированные гидросиликаты, термообработка, ИК-спектр.

Попытки решить вопрос о механизме взаимодействия сахаров и портландцемента предпринимаются достаточно давно [1—7]. Однако разнообразие эффектов, сопровождающих это взаимодействие и не имеющих убедительного объяснения, не позволяют считать этот вопрос решенным. Развитие инструментальных методов исследования вещества позволили обнаружить новые аспекты адсорбционного взаимодействия сахарозы и силикатов. В частности, авторы [8] методами ПМР, ЯМР  $C^{13}$ ,  $Al^{27}$ ,  $Si^{29}$  обнаружили специфическую адсорбцию сахарозы на поверхностях алюминатов, гидросиликатов и силикатов цемента. Значительная толщина адсорбционных оболочек, состоящих из сахарозы и соадсорбированной воды, а также их высокая прочность являются, как считают авторы, основной причиной замедляющего процессы гидратации цемента действия сахарозы. Причем замедляющее действие наиболее сильно проявляется в отношении силикатов, что обуславливает накопление в составе цементного камня суточного возраста продуктов взаимодействия сахаров и алюминатных фаз цемента. Последние демонстрируют высокую чувствительность к структуре модифицирующего углевода, образуя продукты гидратации различной структуры и свойств [9]. Однако оценить свойства продуктов взаимодействия именно углеводов и силикатов возможно лишь при увеличении доли последних в гидратированной системе. Реализация данного условия возможна, если процесс гидратации модифицированного углеводами цемента проводить в условиях помола, позволяющего механически удалять гидросиликатные оболочки. Описанный подход был реализован в работе [10]: измельчение модифицированной цементной суспензии проводилось в планетарной мельнице в течение 2 часов, что позволило достичь значительных степеней растворения и конверсии исходных цементных силикатов.

В результате исследования выяснилось, что углеводы образуют с цементными гидросиликатами продукты присоединения, морфология наночастиц которых определяется видом модифицирующего углевода. Изомерные углеводы сахароза, мальтоза, лактоза формируют два вида продуктов присоединения: агрегированные частицы, состоящие из наночастиц (20...40 нм) аморфного вещества и призматические наночастицы различной анизомет-

ричности. Указанные частицы не имеют индивидуальных отражений на дифрактограммах и идентифицируются как слабозакристаллизованные фазы. Указанные углеводы делятся на две группы: в присутствии редуцирующих лактозы и мальтозы образуются преимущественно призматические частицы; в присутствии нередуцирующей сахарозы образуются преимущественно агрегированные частицы. Причины такой дифференциации определяются особенностями адсорбции углеводов: сахароза адсорбируется с участием ОН-групп пиранозного и фуранозного циклов молекулы [8], тогда как лактоза и мальтоза могут адсорбироваться либо по пиранозному циклу, либо по открытому фрагменту молекулы. Кроме того, и мальтоза, и лактоза способны окисляться до соответствующих карбоновых кислот. Развитие окислительных процессов при повышении температуры приводит к дестабилизации углевод-силикатных комплексов и их разрушению. Также выяснилось, что наночастицы, сформированные в присутствии сахарозы и лактозы, демонстрируют большую термостабильность и начинают разрушаться только при 200 °С, тогда как наночастицы, сформированные в присутствии мальтозы, начинают разрушаться при 150 °С. Однако независимо от природы углевода, в продуктах термолиза присутствуют сферические наночастицы аморфного вещества диаметром 100...200 нм. Иными словами, удаление воды, входящей в состав углевод-гидросиликатных комплексов сопровождается глубокой реструктуризацией последних, что свидетельствует о важной роли воды в отношениях углеводов и гидросиликатов. Определение роли воды в углевод-силикатных комплексах возможно спектральными методами [11—14], в частности изучением изменений ИК-спектров указанных продуктов в ходе дегидратации. Таким образом, целью представленной работы явилось изучение процессов дегидратации модифицированных цементных гидросиликатов методом ИК-спектроскопии.

Объектом исследования был выбран портландцемент ЦЕМ II/В-Ш 32,5 Н ОАО «Вольскцемент». В качестве модифицирующего углевода была использована *D*-мальтоза в количестве 5 % от массы цемента. Гидратация углевод-цементной смеси проводилась в условиях помола аналогично [10] при В/Ц = 4,0. Твердая фаза полученной суспензии отфильтровывалась и промывалась ацетоном для остановки процессов гидратации. Ацетон из образцов удалялся вакуумированием (25 °С). Полученный образец делился на порции, которые термообрабатывались при 105, 150 и 200 °С соответственно.

ИК-исследование проводилось на оборудовании (спектрофотометр ФТ-801) научно-образовательного центра по нанотехнологиям и наноматериалам СГТУ им. Ю. А. Гагарина.

Согласно данным [10], разрушение модифицированных мальтозой цементных гидросиликатов происходит уже при 150 °С (рис. 1 *a, б, в*); процесс сопровождается образованием сферических частиц (50...200 нм), которые, по видимому, являются основным продуктом термолиза в этих условиях. При 200 °С нанофаза модифицированного образца представлена плотными призматическими частицами (соотношение сторон 1/7...1/8) (рис. 1, *з*), нитевидными частицами (рис. 1, *д*) и агрегированными частицами, сформированными из наночастиц, диаметром 40...100 нм (рис. 1, *е*). Изменения в ИК-спектре модифицированного образца представлены на рис. 2—4.

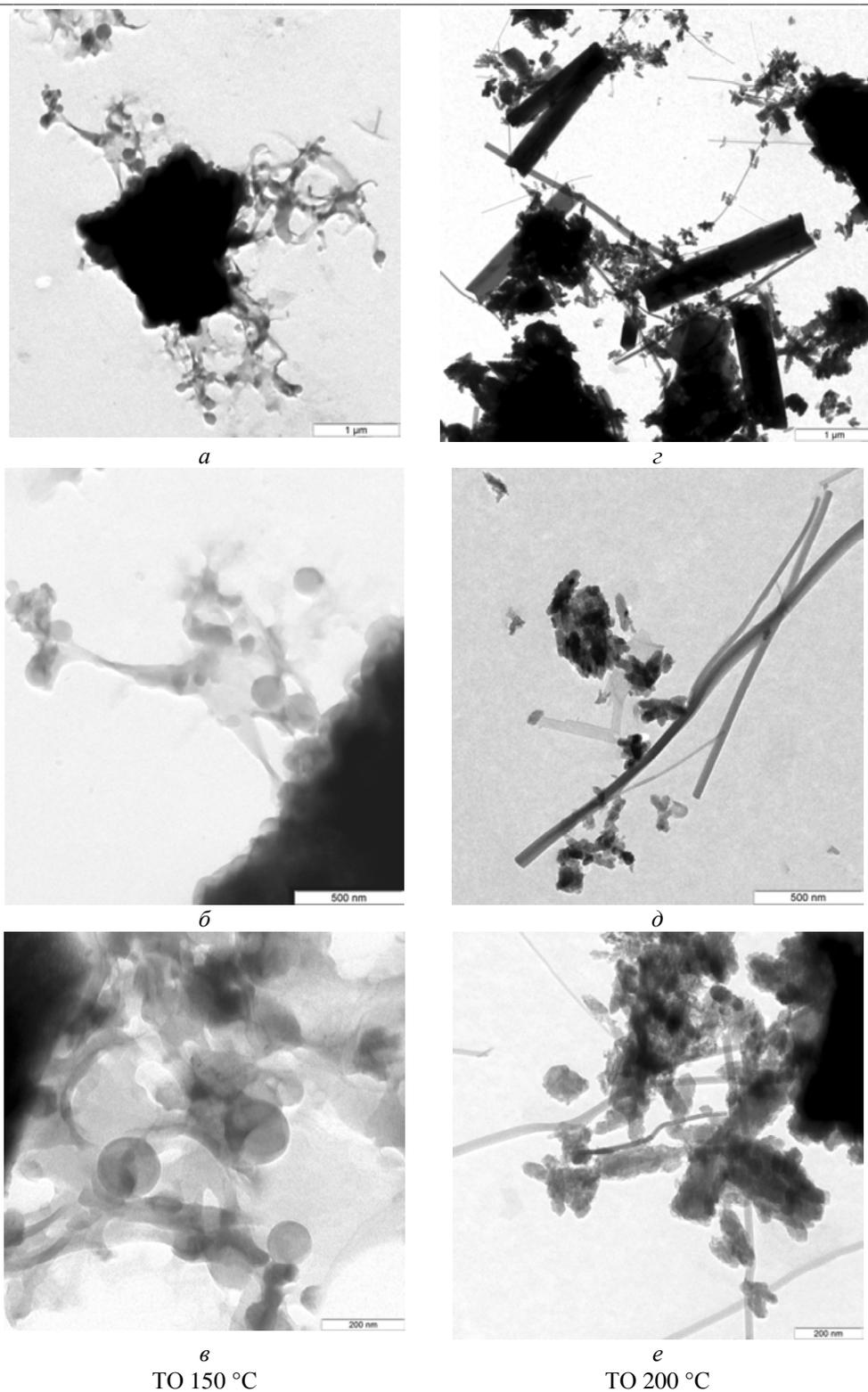


Рис. 1. Продукты термализа модифицированного мальтозой образца

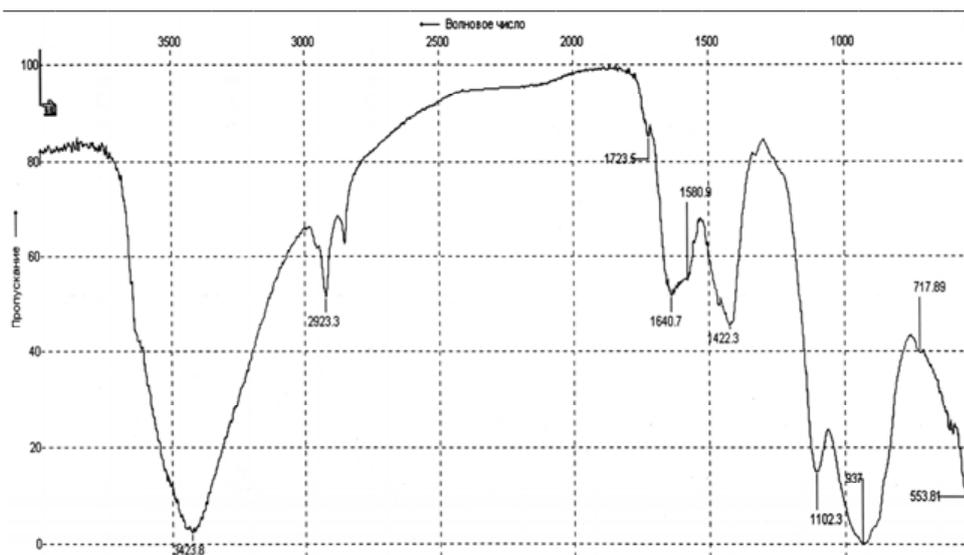


Рис. 2. ИК-спектр модифицированного образца, высушенного при 25 °С

На общем ИК-спектре модифицированного образца (рис. 2) представлены основные полосы поглощения: 3000...3700  $\text{см}^{-1}$  — широкая полоса поглощения ОН-групп, связанных водородными связями. В данном диапазоне частот поглощают ОН-группы как воды, так и углевода, в связи с чем данная полоса поглощения малоинформативна. Колебания молекулы мальтозы проявляются в серии полос поглощения в области 2800...3000  $\text{см}^{-1}$  (валентные колебания  $\text{СН}_2$ -групп) и 1725  $\text{см}^{-1}$  (валентные колебания альдегидной  $\text{С=O}$ -группы) [15]. Остальные полосы поглощения отвечают деформационным колебаниям ОН-группы воды (1640  $\text{см}^{-1}$ ) (которая может находиться в адсорбированном виде на поверхности силиката [11] или заполнять межслоевое пространство тоберморитовых силикатов [12, 13]) и различным колебаниям кремнекислородного остова (1100, 930  $\text{см}^{-1}$ ) [13]. Анализ динамики изменения интенсивности полос поглощения 1100 и 930  $\text{см}^{-1}$  (рис. 3) показывает, что по мере роста температуры термообработки происходит полимеризация силикатов: при 25 °С на спектре отчетливо видны полосы поглощения 110 и 937  $\text{см}^{-1}$ , что соответствует ассиметричным валентным колебаниям ( $\nu_{\text{as}}$ ) Si-O-Si островных силикатов кальция (рис. 3, а) [13]. По мере роста температуры термообработки полоса поглощения при 937  $\text{см}^{-1}$  расширяется, вторая полоса поглощения (1102  $\text{см}^{-1}$ , 25 °С) смещается в длинноволновую часть спектра до 1088  $\text{см}^{-1}$  (при 200 °С), теряя в интенсивности (рис. 3, б) — такая картина характерна для тоберморита [8]. Последнему соответствует и полоса поглощения 1640  $\text{см}^{-1}$ , отвечающая деформационным колебаниям ОН-групп межслоевой воды [13, 14]. По всей видимости, в системе присутствуют обе структуры — и тоберморита, и  $\text{CaSiO}_4$ , но с ростом температуры меняется их соотношение. Интенсивная полоса поглощения в области 1420  $\text{см}^{-1}$  соответствует карбонату кальция.

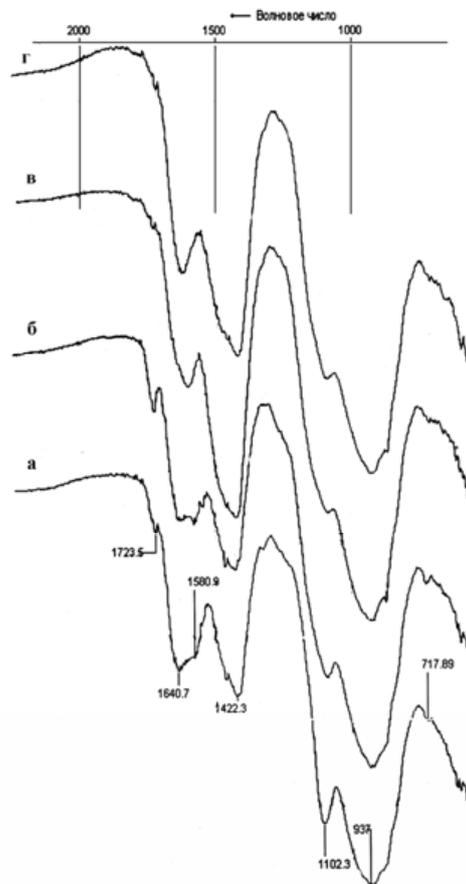


Рис. 3. ИК-спектры модифицированного образца (кювета КВг) при различных температурах термообработки: *a* — 25 °C; *б* — 105 °C; *в* — 150 °C; *г* — 200 °C

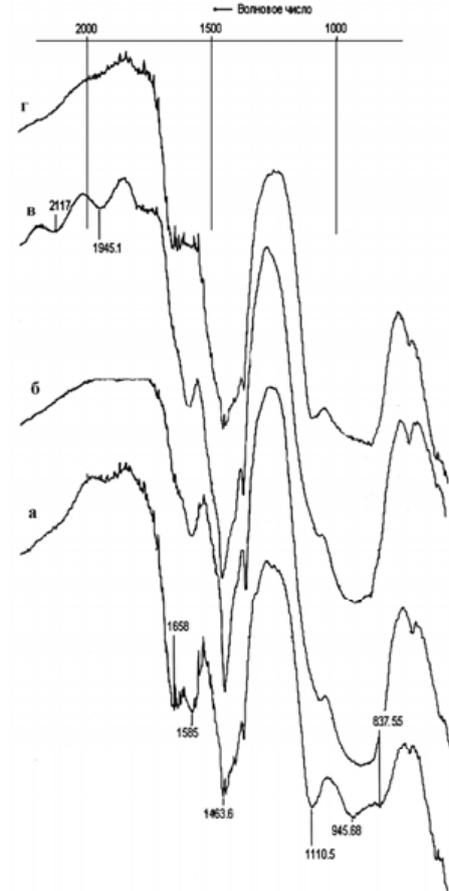


Рис. 4. ИК-спектры модифицированного образца (в нуйоле) при различных температурах термообработки: *a* — 25 °C; *б* — 105 °C; *в* — 150 °C; *г* — 200 °C

Однако КВг-кювета отличается высокой гигроскопичностью, что мешает удалению воды из силикатной системы. В связи с этим была проведена параллельная съемка образца в гидрофобном нуйоле (см. рис. 4).

Сильные полосы поглощения нуйола в области  $1456$  и  $1375$   $\text{см}^{-1}$  маскируют полосу поглощения карбонатов ( $1420$   $\text{см}^{-1}$ ), однако в отсутствие гигроскопичного КВг доминантная в данной области полоса поглощения деформационных колебаний межслоевой воды ( $1640$   $\text{см}^{-1}$ ) исчезает и доминирующей в этой области остается полоса поглощения  $1585$   $\text{см}^{-1}$ , связанная, по-видимому, с присутствием в структуре силиката молекулы углевода. Появление полосы поглощения  $1660$   $\text{см}^{-1}$  на спектре (см. рис. 4, *г*) объясняется частичной регидратацией образца в процессе подготовки к анализу. Наибольший интерес вызывает спектр на рис. 4, *в*, где в результате частичной регидратации образца появляются две слабые полосы поглощения  $2117$  и  $1945$   $\text{см}^{-1}$ , полностью исчезающие при повторном прокаливании. Отнесение показателей полос поглощения в рамках данной работы затруднительно, однако такое поведение системы (с учетом микроскопического анализа (см. рис. 1)) свиде-

тельствует, что термообработка образца при температурах выше 150 °С приводит к кристаллизации аморфной фазы и стабилизации ее свойств.

Таким образом, гидратация цемента в присутствие мальтозы приводит к образованию тоберморитоподобных структур, чье межслоевое пространство частично заселяется молекулами углевода. Взаимодействие межслоевой воды с интеркалированным углеводом приводит к появлению в ИК-спектре полосы поглощения 1590 см<sup>-1</sup>.

Продукты термолиза модифицированных гидросиликатов способны к частичной регидратации путем поглощения влаги воздуха и восстановлению объема межслоевой воды, характерной для тоберморита.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Birchall J. D., Thomas N. L.* The mechanism of retardation of setting of OPC by sugars // *Br. Ceram. Proc.* 1984. Vol. 35. Pp. 305—315.
2. *Рамачандран В., Фельдман Р., Бодуэн Дж.* Наука о бетоне: физико-химическое бетоноведение / под ред. В. Б. Ратинова. М.: Стройиздат, 1986. 278 с.
3. *Young J. F.* A review of the mechanisms of set-retardation in Portland cement pastes containing organic admixtures // *Cem. Concr. Res.* 1972. 2(4). Pp. 415—433.
4. Effects of Saccharide Set Retarders on the Hydration of Ordinary Portland Cement and Pure Tricalcium Silicate / *Zhang L., Lionel J. J. Catalan, Raymond J. Balec, Andrew C. Larsen, Hassan Haji Esmacili, Stephen D. Kinrade* // *J. Am. Ceram. Soc.* 2010. V. 93 [1]. Pp. 279—287.
5. *Peterson V. K., Juenger M. C. G.* Hydration of Tricalcium Silicate: Effects of CaCl<sub>2</sub> and Sucrose on Reaction Kinetics and Product Formation // *Chem. Mater.* 2006. Vol. 18. Pp. 5798—5804.
6. *Khan B., Baradan B.* The effect of sugar on setting-time of various types of cements // *Quarterly science vision.* 2002. Vol. 8 (1). Pp. 71—78.
7. *Juenger M. C. G., Jennings H. M.* New insights into the effects of sugar on the hydration and microstructure of cement pastes // *Cement and Concrete Research.* 2002. № 32. Pp. 393—399.
8. Origins of saccharide-dependent hydration at aluminate, silicate, and aluminosilicate surfaces / *B. J. Smith, A. Rawal, G. P. Funkhouser, La. R. Roberts, V. Gupta, J. N. Israelachvili, B. F. Chmelka* // *PNAS.* 2011. Vol. 108. № 22. Pp. 8949—8954.
9. *Шошин Е. А., Тимохин Д. К., Обычев Д. О.* Формирование нанофазы портландцемента на ранних сроках твердения в присутствии дисахаридов // *Научное обозрение.* 2015. № 4. С. 159—168.
10. Микроскопическое исследование продуктов термической дегидратации модифицированных цементных гидросиликатов / *Е. А. Шошин, А. В. Поляков, Н. Н. Былинкина, А. М. Буров* // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова.* 2016. № 1. С. 18—25.
11. *Киселев А. В., Лыгин В. И.* Инфракрасные спектры поверхностных соединений и адсорбированных веществ. М.: Наука, 1972. 459 с.
12. *Лазарев А. Н.* Колебательные спектры и строение силикатов. Л.: Наука, 1968. 348 с.
13. *Плюснина И. И.* Инфракрасные спектры силикатов. М.: МГУ, 1967. 190 с.
14. Structure of Calcium Silicate Hydrate (C-S-H): Near-, Mid-, and Far-Infrared Spectroscopy / *P. Yu, R. J. Kirkpatrick, B. Poe, P. F. McMillan, X. Cong* // *J. Am. Ceram. Soc.* 1999. 82 [3]. Pp. 742—48.
15. *Наканиси К.* Инфракрасные спектры и строение органических соединений. М.: Мир, 1965. 209 с.

© Шошин Е. А., Иващенко Ю. Г., 2016

Поступила в редакцию  
в январе 2016 г.

Ссылка для цитирования:

*Шошин Е. А., Иващенко Ю. Г.* Исследование процессов дегидратации модифицированных цементных гидросиликатов методом ИК-спектроскопии // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура.* 2016. Вып. 43(62). С. 104—111.

Об авторах:

**Шошин Евгений Александрович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительных материалов и технологий, Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина. Российская Федерация, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, [shoshin234@mail.ru](mailto:shoshin234@mail.ru)

**Ивашенко Юрий Григорьевич** — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительных материалов и технологий, Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина. Российская Федерация, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, [psk@sstu.ru](mailto:psk@sstu.ru)

**E. A. Shoshin, Yu. G. Ivashchenko**

## STUDY OF THE DEHYDRATION PROCESS OF MODIFIED CEMENT HYDROSILICATES BY THE IR-SPECTROSCOPY

The process of dehydration of modified cement hydrosilicates is studied by the IR spectroscopy. It is established that the modifying carbohydrate of maltose is capable to fill the interlayer space of tobermorite hydrosilicates. In the presence of maltose new absorption bands form in the IR spectrum of tobermorite. The position and nature of these absorption bands depend on the conditions of dehydration.

**Key words:** portland cement, maltose, grinding, modified hydrosilicates, heat treatment, IR-spectrum.

### REFERENCES

1. Birchall J. D., Thomas N. L. The mechanism of retardation of setting of OPC by sugars. *Br. Ceram. Proc.*, 1984, vol. 35, pp. 305—315.
2. Ramachandran V., Fel'dman R., Boduen Dzh. *Nauka o betone: fiziko-khimicheskoe betonov-edenie* [Science of concrete: physical and chemical concrete science]. Moscow, Stroizdat Publ., 1986. 278 p.
3. Young J. F. A review of the mechanisms of set-retardation in Portland cement pastes contain- ing organic admixtures. *Cem. Concr. Res.*, 1972, 2(4), pp. 415—433.
4. Zhang L., Lionel J. J. Catalan, Raymond J. Balec, Andrew C. Larsen, Hassan Haji Esmaeili, Stephen D. Kinrade. Effects of Saccharide Set Retarders on the Hydration of Ordinary Portland Cem- ent and Pure Tricalcium Silicate. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2010, vol. 93 [1], pp. 279—287.
5. Peterson V. K., Juenger M. C. G. Hydration of Tricalcium Silicate: Effects of  $\text{CaCl}_2$  and Su- crose on Reaction Kinetics and Product Formation. *Chem. Mater.*, 2006, vol. 18, pp. 5798—5804.
6. Khan B., Baradan B. The effect of sugar on setting-time of various types of cements. *Quar- terly science vision*, 2002, vol. 8 (1), pp. 71—78.
7. Juenger M. C. G., Jennings H. M. New insights into the effects of sugar on the hydration and microstructure of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 2002, no. 32, pp. 393—399.
8. Smith B. J., Rawal A., Funkhouser G. P., Roberts La. R., Gupta V., Israelachvili J. N., Chmelka B. F. Origins of saccharide-dependent hydration at aluminate, silicate, and aluminosilicate surfaces. *PNAS*, 2011, 108(22), pp. 8949—8954.
9. Shoshin E. A., Timokhin D. K., Obychev D. O. [Formation of the nanophase in portland cem- ent at early stages of solidification with disaccharides]. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific survey], 2015, no. 4, pp. 159—168.
10. Shoshin E. A., Polyakov A. V., Bylinkina N. N., Burov A. M. [Microscopic research of products of the thermal dehydration of the modified cement hydrosilicates]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova* [Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov], 2016, no. 1, pp. 18—25.
11. Kiselev A. V., Lygin V. I. *Infrakrasnye spektry poverkhnostnykh soedinenii i adsorbiro- vannykh veshchestv* [Infrared spectra of surface compounds and the adsorbed substances]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 459 p.
12. Lazarev A. N. *Kolebatel'nye spektry i stroenie silikatov* [Vibrational spectra and the struc- ture of silicates]. Leningrad, Nauka Publ., 1968. 348 p.
13. Plyusnina I. I. *Infrakrasnye spektry silikatov* [Infrared spectra of silicates]. Moscow, MSU Publ., 1967. 190 p.

14. Yu P., Kirkpatrick R. J., Poe B., McMillan P. F., Cong X. Structure of Calcium Silicate Hydrate (C-S-H): Near-, Mid-, and Far-Infrared Spectroscopy. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1999, 82 [3], pp. 742—48.

15. Nakanisi K. *Infrakrasnye spektry i stroenie organicheskikh soedinenii* [Infrared spectra and the structure of organic compounds]. Moscow, Mir Publ., 1965. 209 p.

*For citation:*

Shoshin E. A., Ivashchenko Yu. G. [Study of the dehydration process of modified cement hydrosilicates by the IR-spectroscopy]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 104—111.

*About authors:*

**Shoshin Evgenii Aleksandrovich** — Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Construction Materials and Technology Department, Saratov State Technical University named after Yu. A. Gagarin. 77, Politekhnicheskaya St., Saratov, 410054, Pussian Federation, [shoshin234@mail.ru](mailto:shoshin234@mail.ru)

**Ivashchenko Yurii Grigor'evich** — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Construction Materials and Technology Department, Saratov State Technical University named after Yu. A. Gagarin. 77, Politekhnicheskaya St., Saratov, 410054, Pussian Federation, [psk@sstu.ru](mailto:psk@sstu.ru)

УДК 621.81:621.9

**О. В. Бурлаченко, А. М. Буров, М. В. Иванов**

*Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ УЗЛОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

Проведено исследование зависимости работоспособности деталей и узлов строительной техники от режимов поверхностной обработки и применяемых материалов, модифицирующих поверхностные слои. Проанализированы механическое, физическое и химическое воздействия на обрабатываемую поверхность при определенной кинематике перемещений в процессе эксплуатации на примере исследования износа цилиндров двигателей. Предложена технология получения беспористых горячештампованных порошковых сплавов с повышенными прочностными свойствами наружной поверхности и высокими пластическими свойствами сердцевин. Установлено единство процессов силового, температурного и иного воздействия на рабочую поверхность деталей при их изготовлении и эксплуатации.

**Ключевые слова:** приработка, подшипник скольжения, узел трения, износостойкость, поверхностное пластическое деформирование, порошковый биметаллический композит.

На современном этапе необходимо комплексное решение проблемы обеспечения эксплуатационных свойств машин и оборудования, заключающееся в разработке не только отдельных методов, обеспечивающих или улучшающих какой-либо показатель работоспособности, зачастую без связи с реальным состоянием сопряжения, но в создании и реализации технологий, реализующих комплексные физико-технические и механические воздействия на контактную систему [1].

Новизна методов обработки определяется всеми компонентами технологической системы: станком, технологической оснасткой, процессом формообразования поверхностного слоя детали. Каждый из компонентов имеет собственную новизну или же создает новизну системы в целом за счет определенного нетрадиционного сочетания известных компонентов.

При проектировании новых методов обработки и технологических процессов используется как накопленный опыт, так и новый системный подход, базирующийся на единстве технологии проектирования, производства и эксплуатации.

Практически все технологии обработки поверхностей деталей основаны на механическом, физическом, химическом или их совместном воздействии на обрабатываемые узлы трения при определенной кинематике перемещений инструмента и заготовки. Наряду с первоначальным позиционированием деталей строительных машин в сборочной единице, определяемым точностью размеров, в процессе эксплуатации они воспринимают новые механические, физические или химические воздействия при определенной кинематике их движения [2]. Это приводит к изменению взаимного положения собранных деталей, потере точности, а иногда и к разрушению.

Все это говорит об идентичности процессов воздействия на узлы строительных машин при изготовлении и в процессе эксплуатации. Характер протекания процессов определяется: физико-механическими свойствами; пара-

метрами макро- и микрогеометрии; свойствами смазки; кинематическими, динамическими и температурными условиями эксплуатации; формой, размерами и материалом рабочей части инструмента.

Это свидетельствует о необходимости целенаправленного кинематического, силового, температурного и химического воздействия на узлы трения при изготовлении, исходя из дальнейшего функционального назначения.

Так, для поверхностей трения деталей строительных машин и оборудования финишную обработку можно рассматривать как процесс приработки, обеспечивающий их равновесное состояние.

Это относится:

к цилиндрическим, сферическим и криволинейным поверхностям трения (подшипники скольжения, чашки дифференциала заднего моста автомобиля, кулачки распределителей, рабочие поверхности зубьев и др.);

цилиндрам двигателей, цилиндрическим и коническим подшипникам качения;

рабочим поверхностям качения железнодорожных рельсов и колес;

резьбовым соединениям;

рабочим поверхностям режущих и деформирующих инструментов и т. д.

Независимо от способа обработки поверхностного слоя задача заключается в создании износостойкой рабочей поверхности узла трения или хорошо прирабатываемой. Естественно, что для повышения долговечности таких узлов, соединений и инструментов необходимо при изготовлении обеспечить различные эксплуатационные показатели, а в большинстве случаев — создавать новые поверхностные слои, обладающие быстрой прирабатываемостью [3]. Все это ставит задачу целенаправленного системного исследования существующих и разработки новых технологий и материалов обработки узлов строительных машин для повышения работоспособности, исходя из их функционального назначения.

Материалы и детали узлов трения помимо износостойкости должны обладать комплексом других свойств, обеспечивающих надежную работу конструкции в целом [4, 5].

Наиболее подходящие материалы для пар трения скольжения подбираются в каждом отдельном случае только на основании тщательного сопоставления условий работы трущихся деталей, исходных свойств материалов и тех изменений, какие они претерпевают на поверхностях трения [6, 7]. С учетом этих факторов можно сформулировать следующие правила подбора материалов:

1. Сочетание твердого материала с мягким, имеющим температуру рекристаллизации ниже средней температуры поверхности трения при работе. При таком сочетании металлы хорошо противостоят заеданию и характеризуются высокой надежностью. Для пары, образованной поверхностями трения, имеющими разные твердости и размеры, можно выделить два условия:  $H_1 > H_2$ ,  $S_1 < S_2$  и  $H_1 < H_2$ ,  $S_1 < S_2$ , где  $H_1$ ,  $H_2$  — твердости,  $S_1$  и  $S_2$  — размеры. Тщательная приработка, улучшение условий смазывания значительно расширяют области применения пар трения из твердых материалов.

2. Сочетание твердого материала с твердым (сочетание азотированной, хромированной и закаленных сталей).

3. Избегание сочетаний мягкого материала с мягким, а также пар из одинаковых материалов (незакаленная сталь по незакаленной стали, алюминиевый сплав по алюминиевому, медный сплав по медному, хром по хрому, никель по никелю, пластмасса по пластмассе), за исключением пар из политетрафторэтилена и полиэтилена. Подобные пары имеют низкую износостойкость и ненадежны в работе. При незначительных перегрузках в таких парах образуются очаги схватывания и происходит глубинное вырывание материалов со взаимным их налипанием на поверхности трения.

4. Применение в труднодоступных для смазывания конструкциях пористых, порошковых материалов и антифрикционных сплавов.

5. Применение в качестве фрикционных и антифрикционных материалов пластмасс. Они повышают надежность и срок службы узла трения, снижают массу конструкции и расход дефицитных цветных металлов, уменьшают вибрации и улучшают акустические свойства машин и механизмов.

6. Реализация режима избирательного переноса путем выбора материалов пары трения, смазочных материалов и присадок к ним.

7. Учет неблагоприятных изменений в парах трения, в частности возможности наводороживания при эксплуатации поверхностей трения, что резко снижает износостойкость и надежность работы узла трения. Применение материалов, трудно поддающихся таким изменениям.

На данный момент пористые порошковые сплавы получили достаточное применение в узлах трения скольжения строительных машин, работающих при небольших нагрузках и скоростях. Этот фактор обусловлен низким уровнем механических свойств. Однако более низкие цены и высокая работоспособность в условиях жидкостного и полужидкостного трения (пропитка минеральными маслами) позволяет использовать пористые сплавы в качестве замены более дорогим материалам в узлах трения скольжения.

Малопористые порошковые сплавы, имеющие высокие механические свойства, не получили широкого применения в узлах трения скольжения строительных машин из-за высокой их стоимости, а в узлах трения качения не применяются, вследствие недостаточного прикладного изучения в этом направлении.

В качестве объекта исследования использовался биметаллический шатун с игольчатым подшипником. В данной методике предусматривается возможность использования высокоплотных порошковых сплавов в узлах трения и приводятся экспериментальные данные по технологии получения биметаллического порошкового композита методом горячей штамповки. Предложена методика экспериментальных исследований для проведения проверки эффективности изготовления подшипника горячей штамповкой, предварительно спеченной, биметаллической порошковой заготовки.

Поверхность качения изготавливали из порошкового сплава СП80ХЗ, который имеет низкую пластичность, при этом обладает высокой прочностью и повышенными антифрикционными свойствами после закалки.

После штамповки по линии контакта корпуса и втулки образуется неразъемное соединение (сварка). В результате термообработки биметаллический композит обладает следующим комплексом механических свойств: корпус подшипника —  $\sigma_b$  = до 1500 МПа, КС — не менее 200 К·Дж/м<sup>2</sup>, НРС 30...40,  $\delta$  — не менее 4...6 %; износостойкая втулка —  $\sigma_b$  = более 1800 МПа,

$KC = \text{до } 160 \text{ К}\cdot\text{Дж/м}^2$ ,  $\delta = 3\text{...}4 \%$ ,  $HRC 60\text{...}65$ , где  $\sigma_b$  — временное сопротивление;  $\delta$  — относительное удлинение;  $KC$  — ударная вязкость;  $HRC$  — твердость.

На основании проведенных исследований установлена эффективность изготовления корпуса подшипника из сплава порошковой стали СП40Д2Н3 по сравнению с дорогостоящими легированными низкоуглеродистыми сталями 12ХН3А и 20ХН3А, технология изготовления которых позволяет получить параметры микротвердости до 60 HRC. Порошковая сталь СП40Д2Н3 обладает после штамповки следующими свойствами:  $\sigma_b = 60\text{...}75 \text{ кг/мм}^2$  (600...750 МПа) — временное сопротивление разрыву;  $\delta = 10\text{...}12 \%$  — относительное удлинение;  $KC = 200\text{...}400 \text{ К}\cdot\text{Дж/м}^2$  — ударная вязкость. Данная порошковая сталь позволяет повысить микротвердость поверхностного слоя деталей на 5...10 % по сравнению с уже известными технологиями и может применяться для несущих конструктивных узлов строительных машин (например, стержень шатуна).

Стендовые испытания биметаллического шатуна с игольчатым подшипником показали его высокую работоспособность.

Проведенные испытания показали, что различные участки рабочих поверхностей зубьев, наряду с тем, что они работают при различных условиях, должны также обеспечивать совершенно разные эксплуатационные свойства. Так, у их основания должно обеспечиваться сопротивление усталости, на участке у делительной окружности — контактная прочность, на остальных участках боковой поверхности — износостойкость. Это характерно особенно для силовых зубчатых передач. Результаты проведенных исследований установили, что принятые технологии обработки боковых поверхностей зубьев (фрезерование и шлифование) не могут обеспечить выполнение таких условий [2]. Это обеспечено целенаправленным изменением силового и температурного воздействий на обрабатываемую поверхность зуба, что реализуется через комбинированную обработку поверхностного пластического деформирования и электрохимической обработки, которая требует целенаправленной разработки как инструмента, так и оборудования.

В свою очередь, для повышения долговечности пар трения необходимо максимально снизить период приработки в процессе эксплуатации [8]. Этого добиваются финишной обработкой поверхностей трения, моделирующей ускоренный процесс их приработки. В соответствии с разработанной теорией износа и трения процесс приработки представляет микрорезание и пластические деформации микронеровностей поверхностей трения.

Обеспечивается этот процесс приработки на стадии финишной обработки поверхностей трения специальным инструментом с моделированными микронеровностями. Рабочая поверхность инструментов должна проскальзывать по поверхности трения обрабатываемой детали, вызывая микрорезание и микродеформирование ее шероховатости [9]. В качестве такого инструмента использованы притирочный абразивный брусок (с определенной зернистостью) или иглофреза (с определенным диаметром рабочих игловок). Усилия прижатия и скорость проскальзывания инструмента определяются условиями эксплуатации обрабатываемой поверхности трения.

В зубчатых передачах в процессе приработки изменяется форма эвольвентной поверхности, увеличивается боковой зазор, что ведет к росту шума,

изменению линии контакта и разрушению зубьев [10]. Избежать этого явления можно, если в процессе изготовления и приработки зубчатых передач смоделировать все эти процессы: при зубонарезании и шлифовке зубьев — обеспечить их эксплуатационный профиль, а при обкатке — равновесное состояние качества поверхности. Для этого должен быть скорректирован рабочий профиль фрезы или шлифовального круга. Это, в свою очередь, говорит о необходимости учета при проектировании инструмента функционального назначения обрабатываемой поверхности.

Обработка внутренних резьб в алюминиево-кремнистых сплавах связана со значительными трудностями. Резание затруднено вследствие вязких свойств материала, а пластическое деформирование — его хрупкостью. Все это привело к необходимости комбинированной обработки и разработке специального инструмента, обеспечивающего при обработке благоприятные условия резания и пластического деформирования, что позволило значительно повысить производительность обработки и качество резьбы.

Также следует отметить, что для окончательной обработки боковых поверхностей зубчатых колес используется обкатка или специальная технология финишной обработки, обеспечивающая процесс микрорезания и пластических деформаций микронеровностей. Финишная обработка обеспечивается алмазным или обычным шевингованием.

Использование теории пластичности и контактного взаимодействия позволило создать новый метод обработки деталей, позволяющий значительно увеличить (в десятки раз) их поверхность соприкосновения с окружающей средой. В частности, это и имеет огромные значения при создании теплообменников.

Результаты показали, что тот или иной метод обработки реализуется через выполнение технологических операций, объединение которых в одной детали представляет собой технологический процесс [11].

Экономический эффект от новых технологических процессов значительно возрастает при принятии предложенной теории единства процесса проектирования, изготовления, эксплуатации и ремонта.

Концепция объединения технологий производства и эксплуатации позволяет некоторые процессы из производства переносить в эксплуатацию. Например, для повышения износостойкости пар «трение — скольжение» в условиях граничного трения зачастую на одну из поверхностей трения при изготовлении наносят мягкую пленку. Взамен этой операции можно при эксплуатации ввести глицерин и медный порошок. Это позволит на поверхности трения аналогичным образом, но уже при эксплуатации, сформировать мягкую антифрикционную пленку, обеспечивающую явление избирательного переноса. Конструирование направляющих скольжения металлорежущих станков с бронзовыми вставками и введение в смазку глицерина позволяет повысить износостойкость при эксплуатации в несколько раз.

Твердые частицы в смазочном слое подшипника понижают его долговечность. Продукты изнашивания обладают, как правило, высокой абразивной способностью, так как в основном состоят из оксидов, а твердость оксида выше, чем твердость основного материала. Направляющие металлорежущих станков при надлежащей защите сохраняют, например, следы шабрения или шлифования по истечении 8...10 лет непрерывной работы.

Подшипники скольжения изготавливаются механической обработкой заготовок из литья или из проката компактных материалов (антифрикционный чугун, антифрикционная бронза, фторопласт, антифрикционный алюминиевые сплавы и т. д.). Все эти материалы и сплавы ряд недостатков. Главным недостатком является низкая работоспособность в условиях сухого и полусухого трения, что при проведении строительных работ требует регулярного технического обслуживания подшипникового узла трения. Кроме этого, подшипники из цветных сплавов дорого стоят, что может ограничивать их применение.

На основании проведенных исследований установлено, что применение подшипников скольжения, полученных по данной технологии, позволяет изменить характер работы подшипника. Подшипник начинает работать в условиях самосмазывания, что дает возможность обеспечить в начальный момент гарантированное жидкостное трение и с последующим переходом в полужидкостное трение. Такой характер работы обеспечивает более длительный цикл работы и повышает износостойкость подшипникового сплава, вследствие снижения коэффициента трения.

Затруднения с механической обработкой резанием труднообрабатываемых материалов, а также необходимость повышения производительности труда привели к созданию комбинированных методов обработки [12]. Совершенствование существующих технологий обработки узлов строительных машин позволило добиться повышения их работоспособности. Так, цилиндрические и конические ролики подшипников качения для предотвращения их разрушения по краям обрабатывают с эксплуатационным распределением давлений вдоль образующей. Это позволило обеспечить шлифование роликов бесконечной лентой. Правильный расчет условий обработки (ширина и натяжение ленты, радиальная сила) позволяет получить форму ролика, обеспечивающую практически равномерное распределение давления вдоль образующей при его эксплуатации [13].

Аналогично обстоит дело и с подшипниками скольжения, но в данном случае неравномерность давления при эксплуатации возникает как вдоль образующей, так и по дуге контакта. Избежать этого можно отделочно-упрочняющей обработкой поверхностного пластического деформирования поверхности трения подшипника при закономерно изменяющемся рабочем давлении.

Более низкие цены и более высокая работоспособность в условиях жидкостного и полужидкостного трения (пропитка минеральными маслами) позволяет использовать пористые сплавы в качестве замены более дорогих материалов в узлах трения скольжения [14, 15]. Данная технология обеспечивает высокие прочность поверхности качения и пластичность стержня шатуна, что обеспечивает лучшую работоспособность изделия.

Научно обоснованное определение требуемых величин воздействующих факторов или их соответствующего изменения, исходя из функционального назначения узлов трения, позволит создавать оптимальные технологии их производства, ремонта и эксплуатации.

Предложенная технология еще раз доказывает, что создаваемые методы обработки и процессы изготовления и ремонта деталей машин строительной техники должны быть готовыми развиваться и иметь возможность эволю-

ционировать и модифицироваться в соответствии с изменяющимися внешними условиями. Изучение взаимодействия рабочей части режущего инструмента и обрабатываемой детали указывает на возможность частичного или полного перевода процесса резания к пластическому деформированию. Это в значительной мере расширяет возможности обычных методов механической обработки.

Таким образом, горячештампованный порошковый биметаллический композит для кинематической пары «трение — скольжение», обладает комплексом механических свойств: высокопластичной сердцевиной из сплава СП40Д2НЗ и высокопрочной, износостойкой поверхностью из сплава СП80ХЗ. Применение данных сплавов с обработкой по предложенной технологии позволяет повысить работоспособность узлов трения строительных машин на 30...40 % по сравнению с традиционными решениями.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бурлаченко О. В. Технологическое обеспечение работоспособности машин: монография. Волгоград, 2002. 200 с.
2. Дюргеров Н. Г. Технологические методы восстановления и повышения износостойкости деталей машин: учебное пособие: в 2-х ч. Ростов н/Д, 2006.
3. Машиностроение. Энциклопедия. Т. III-3. Технология изготовления деталей машин / А. М. Дальский, А. Г. Сулов, Ю. Ф. Назаров и [др.]; под общ. ред. А. Г. Сулова. М. : Машиностроение, 2000. 840 с.
4. Szeri A. Z. Tribology: friction, lubrication and wear. Hemisphere, 1980. P. 64.
5. Ting L. L. Development of a reciprocating test-rig for tribological studies of piston engine moving components // International congress. Detroit, 1993. P. 959—971.
6. Harnoy A., Friedland B., Rachoer H. Modeling and simulation of elastic and friction forces in lubricated bearings for precise motion control // Wear. 1994. Vol. 172. Iss. 2. P. 155—165. doi:10.1016/0043-1648(94)90283-6
7. Findik F. Investigation of explosive welding parameters and their effects on microhardness and shear strength // Materials & design. 2003. Vol. 24. Iss. 8. P. 659—664.
8. Scherngell H., Kneissl A. C. Generation, development and degradation of the intrinsic two-way shape memory effect in different alloy systems // Acta Materialia. 2002. Vol. 50. No. 2. P. 327—341. doi:10.1016/S1359-6454(01)00342-1
9. Matthews F. L., Rawlings R. D. Composite materials. Engineering and science. Cambridge: CRC Press, Woodhead Publishing, 1999. 480 p.
10. Meng Q., Yang H., Nam T., Tae-hyun Nam. Compositionally graded NiTi plate prepared by diffusion annealing // Scripta Materialia. 2012. Vol. 67. № 3. P. 305—308. doi:10.1016/j.scriptamat.2012.05.014
11. Scherngell H., Kneissl A. Influence of the microstructure on the stability of the intrinsic two-way shape memory effect // Materials Science and Engineering: A. 1999. Vol. 273—275. P. 400—403. doi:10.1016/S0921-5093(99)00306-8
12. Старков В. К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. М.: Машиностроение, 1989. 297 с.
13. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А. М. Дальский, Б. М. Базров, А. С. Васильев; под ред. А. М. Дальского. М. : Изд-во МАИ, 2000. 364 с.
14. Буров А. М., Журавлева Е. А., Родин Е. Е. Анализ работоспособности подшипников скольжения в специализированных машинах // Строительные и дорожные машины. 2014. № 5. С. 39—41.
15. Буров А. М. Модифицирование порошковых сплавов сульфидом цинка (ZnS) и его влияние на физико-механические свойства // Технология металлов. 2012. № 5. С. 23—25.

© Бурлаченко О. В., Буров А. М., Иванов М. В., 2016

Поступила в редакцию  
в феврале 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Бурлаченко О. В., Буров А. М., Иванов М. В. Исследование новых технологий и материалов для повышения работоспособности узлов строительных машин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 112—120.

Об авторах:

**Бурлаченко Олег Васильевич** — д-р техн. наук, проф., проректор по учебно-воспитательной работе, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, oburlachenko@yandex.ru

**Буров Анатолий Михайлович** — канд. техн. наук, доцент кафедры морских нефтегазовых сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [20burov15@mail.ru](mailto:20burov15@mail.ru)

**Иванов Максим Витальевич** — аспирант кафедры технологий строительного производства, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, clevermax18@mail.ru

**O. V. Burlachenko, A. M. Burov, M. V. Ivanov**

## RESEARCH OF NEW TECHNOLOGIES AND MATERIALS FOR INCREASED PERFORMANCE OF UNITS OF CONSTRUCTION EQUIPMENT

The research of the dependence of performance of details and units of construction equipment on the modes of surface treatment and applied materials modifying the surface layer is conducted. The mechanical, physical and chemical effects on the surface at a specific kinematics of movements during exploitation by the example of the research of wear of cylinder engines are analyzed. The technology of obtaining of nonporous hot-stamped powder alloys with increased strength properties of the outer surface and high plastic properties of the core is offered. The unity of the processes of power, temperature and other effects on the working surface of the details in their manufacture and exploitation is established.

**Key words:** bedding, plain bearing, friction unit, wearing capacity, surface plastic deformation, bimetallic powder composite.

### REFERENCES

1. Burlachenko O. V. *Tekhnologicheskoe obespechenie rabotosposobnosti mashin* [Engineering support of machine operation capability]. Volgograd, 2002. 200 p.
2. Dyurgerov N. G. *Tekhnologicheskie metody vosstanovleniya i povysheniya iznosostoikosti detalei mashin: uchebnoe posobie: v 2-kh ch.* [Technological method of rework and increase of wear resistance of machine parts. Manual: in 2 parts]. Rostov-on-Don, 2006.
3. Dal'skii A. M., Suslov A. G., Nazarov Yu. F. *Mashinostroenie. Entsiklopediya. T. III-3. Tekhnologiya izgotovleniya detalei mashin* [Machine engineering. Encyclopedia. V. III-3. Machine parts manufacturing technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000. 840 p.
4. Szeri A. Z. *Tribology: friction, lubrication and wear*. Hemisphere, 1980. P. 64.
5. Ting L. L. Development of a reciprocating test-rig for tribological studies of piston engine moving components. *International congress*. Detroit, 1993. Pp. 959—971.
6. Harnoy A., Friedland B., Rachoor H. Modeling and simulation of elastic and friction forces in lubricated bearings for precise motion control. *Wear*, 1994, 172(2), pp. 155—165. [doi:10.1016/0043-1648\(94\)90283-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(94)90283-6)
7. Findik F. Investigation of explosive welding parameters and their effects on microhardness and shear strength. *Materials & design*, 2003, 24(8), pp. 659—664.
8. Scherngell H., Kneissl A. C. Generation, development and degradation of the intrinsic two-way shape memory effect in different alloy systems. *Acta Materialia*, 2002, 50(2), pp. 327—341. [doi:10.1016/S1359-6454\(01\)00342-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00342-1)

9. Matthews F. L., Rawlings R. D. *Composite materials. Engineering and science*. Cambridge, CRC Press, Woodhead Publishing, 1999. 480 p.

10. Meng Q., Yang H., Nam T., Tae-hyun Nam. Compositionally graded NiTi plate prepared by diffusion annealing. *Scripta Materialia*, 2012, 67(3), pp. 305—308. doi:10.1016/j.scriptamat.2012.05.014

11. Scherngell H., Kneissl A. Influence of the microstructure on the stability of the intrinsic two-way shape memory effect. *Materials Science and Engineering: A*, 1999, vol. 273—275, pp. 400—403. doi:10.1016/S0921-5093(99)00306-8

12. Starkov V. K. *Obrabotka rezaniem. Upravlenie stabil'nost'yu i kachestvom v avtomatizirovannom proizvodstve* [Cutting. Control of stability and quality in automated production]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 297 p.

13. Dal'skii A. M., Bazrov B. M., Vasil'ev A. S. *Tekhnologicheskaya nasledstvennost' v mashinostroitel'nom proizvodstve* [Technological heredity in machinery production]. Moscow, MAI Publishing House, 2000. 364 p.

14. Буров А. М., Журавлева Е. А., Родин Е. Е. [Analysis of operation capability of slider bearing in specialized machines]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* [Construction and road building machinery], 2014, no. 5, pp. 39—41.

15. Burov A. M. [Modification of powder alloys by zinc sulfide (ZnS) and its influence on physical-mechanical properties]. *Tekhnologiya metallov* [Construction and road building machinery], 2012, no. 5, pp. 23—25.

*For citation:*

Burlachenko O. V., Burov A. M., Ivanov M. V. [Research of new technologies and materials for increased performance of units of construction equipment]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 112—120.

*About authors:*

**Burlachenko Oleg Vasil'evich** — Doctor of Engineering Science, Professor, Vice-Rector for Studies and Educational Work, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, oburlachenko@yandex.ru

**Burov Anatolii Mikhailovich** — Candidate of Engineering Science, Docent of Sea Oil and Gas Constructions Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, 20burov15@mail.ru

**Ivanov Maksim Vital'evich** — Postgraduate student of Construction Technologies Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, clevermax18@mail.ru

УДК 621.9.048:621.83

**О. В. Бурлаченко, М. В. Иванов**

*Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

## **МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТРАНСМИССИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

Предлагается метод повышения износостойкости поверхностного слоя деталей коробки передач строительных машин. Метод базируется на применении лазерной обработки с рациональными режимами. Рассмотрены особенности упрочнения поверхностного слоя после лазерной обработки.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** лазерная обработка, поверхностный слой, микротвердость, износостойкость, мощность излучения, трансмиссия.

Лазерная обработка материалов основана на том, что использование лазерного излучения позволяет создавать на малом участке поверхности высокие плотности теплового потока, необходимые для интенсивного нагрева или расплавления практически любого материала.

При воздействии на поверхность обрабатываемых металлов и сплавов часть потока лазерного излучения отражается от нее, а остальная часть проникает на малую глубину. Энергия лазерного излучения практически полностью поглощается электронами в приповерхностном слое толщиной  $10^{-6} \dots 10^{-7}$  м. Вследствие этого электронная температура резко повышается, тогда как температура кристаллической решетки остается незначительной.

С течением времени интенсивность передачи энергии свободных электронов кристаллической решетки повышается [1]. Начиная со времени релаксации, разность температур становится минимальной и тепловые процессы в металле можно охарактеризовать общей температурой. Последующий нагрев металла осуществляется по физическим закономерностям, присущим традиционным способам теплового воздействия на металлы. Это дает основание рассматривать распространение теплоты в металлах при лазерной обработке с использованием теории теплопроводности. Процессы распространения теплоты зависят от интенсивности теплового воздействия и в значительной степени — от теплофизических свойств материала.

При лазерной обработке в металлах происходят термомодеформационные и физико-химические процессы. Под термомодеформационными процессами следует понимать упругопластическое деформирование металла вследствие неравномерного нагрева при лазерной обработке и возникновение при этом временных и остаточных напряжений [2]. Физико-химические процессы при лазерной обработке происходят в твердом и расплавленном металле и характеризуются фазовыми и структурными превращениями, растворением и выделением веществ из раствора, диффузией и т. д.

Термомодеформационные процессы и превращения в металлах при лазерной обработке определяют технологическую прочность металла в различных зонах воздействия, т. е. стойкость против образования локальных разрушений при сварке, наплавке, резке, термообработке и других видах лазерной обработки.

Кроме того, термодформационные процессы в значительной степени определяют эксплуатационные свойства деталей и конструкций, обработанных лазерным излучением, т. е. степень соответствия механических и химических свойств условиям и требованиям эксплуатации. И наконец, вопросы точности деталей и конструкций после лазерной обработки основаны на знании закономерностей образования деформаций и напряжений.

Свойства лазерного излучения как универсального инструмента проявляются в самых различных технологических возможностях обработки материалов [3, 4].

Корпоративные свойства лазерного излучения проявляются в возможности эффективной интеграции лазерного излучения с различными технологическими энергетическими источниками энергии – дуговыми, плазменными, индукционными, световыми, ультразвуковыми. Такое объединение позволяет получить новое качество, которое проявляется в виде расширения технологических возможностей процессов обработки материалов и появления новых качеств [5]. Например, увеличение скорости сварки получается не просто сложением скоростей сварки каждого вида технологического процесса, а за счет увеличения эффективности технологического процесса.

Универсальность лазерного излучения как технологического инструмента проявляется в том, что его можно применять для ведения различных технологических процессов — резки, сварки, термообработки, легирования, прошивки отверстий, токарной, фрезерной обработки и т. д.

В условиях производства очень важным фактором является возможность быстрого перехода с обработки одного вида деталей на другой или перехода с одного рабочего места на другое. Лазерный пучок в сочетании с современными средствами компьютерного управления позволяет реализовать эти возможности. Перевод лазерной обработки материалов с одного рабочего места на другое или с одного технологического процесса на другой может составлять несколько секунд, в этом проявляется гибкость лазерного пучка как технологического инструмента [6]. Особенно ярко это свойство лазерного пучка проявляется при использовании его со световолоконными системами.

Локальность обработки в пространстве и времени заключается в возможности сосредоточить энергию лазерного излучения мощностью в мегаватты в объеме от нескольких десятков до нескольких сот микрон, а во времени — в несколько десятков пикосекунд [7]. Столь высокая локальность позволяет обрабатывать строго определенные участки детали с минимальными зонами термического влияния.

Производительность лазерной обработки обеспечивается ее высокой скоростью — скорость резки до 100 м/мин, скорость сварки до 300 мм/с, скорости термообработки до 200 см<sup>2</sup>/мин позволяют судить о лазерном пучке, как о высокопроизводительном обрабатывающем инструменте [8].

Обработку непрерывным лазерным излучением ведут при определенной скорости сканирования луча по поверхности [9]. С ростом плотности мощности и уменьшением относительных скоростей перемещения луча скорости охлаждения падают. В результате закаленная структура отпускается и твердость уменьшается. Максимальная твердость поверхностного слоя достигается при достаточно высокой скорости охлаждения. Однако при низких скоростях перемещения луча увеличивается глубина закаленного слоя.

Следовательно, режимы лазерной обработки оптимизируют в зависимости от требуемых функциональных свойств.

В основе лазерной обработки лежат необычные структурные и фазовые изменения в материале, возникающие вследствие сверхвысоких скоростей его нагрева и последующего охлаждения в условиях лазерного облучения [10]. Важную роль при этом играют возможность насыщения поверхностного слоя элементами окружающей среды, рост плотности дислокаций в зоне облучения и другие эффекты.

Преимущества лазерных методов обработки материалов заключаются в следующем:

возможность разделения лазером обширного класса материалов независимо от их твердости;

возможность получения узких разрезов с минимальной зоной термического влияния в результате острой фокусировки, обеспечивающей локальность нагрева;

практически полное отсутствие механического воздействия на обрабатываемый металл, в связи с чем отпадает необходимость в закреплении разделяемого материала;

обеспечение высокой производительности процесса вследствие достижения высокой плотности мощности при фокусировке луча на поверхность обработки;

возможность контроля и строгой регламентации пребывания материала при высокой температуре в случае применения лазеров импульсно-периодического действия;

возможность автоматизации процесса на высоком уровне; использование соответствующих координатных устройств позволяет проводить лазерную резку по сложному контуру в двух и даже трех измерениях, начав процесс с произвольно выбранного места.

Использование высокой плотности мощности излучения позволило существенно сократить время нагрева, плавления и испарения материала с обеспечением скоростей обработки, сравнимых со скоростью протекания физических процессов в объекте облучения. Кроме того, в результате высоких скоростей обработки и большой степени локальности источника нагрева протяженность участков материала, прилегающих к области воздействия излучения и испытывающих его термическое влияние, составляет несколько долей миллиметра.

Как известно, пучок лазера является универсальным технологическим инструментом, обладающим уникально высокими удельными энергетическими характеристиками для обработки материалов. Обеспечивая плотности мощности в зоне воздействия на поверхность металла более чем  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup> излучение лазера открывает возможность испарения любых металлов при длительности воздействия наносекунды и менее. При столь малой длительности энергетического воздействия зона термического влияния пренебрежимо мала и выгорания химических элементов на вновь образованной поверхности практически не происходит.

Высокая концентрация энергии лазерного пучка в локальном объеме пространства, высокоскоростное управление изменением энергии во времени и ее быстрое перемещение в пространстве открыли принципиально новые возможности в сфере обработки материалов.

Сущность обработки материалов концентрированными и высококонцентрированными потоками энергии заключается в преобразовании, с определенным коэффициентом полезного действия, энергии источника в тепловую энергию, которая производит изменения структурно-фазового состояния поверхностного слоя или агрегатного состояния вещества. В отличие от концентрированных источников энергии (электрическая дуга, плазменная обработка, светолучевая и др.), высококонцентрированные источники энергии (лазерные, электронно-лучевые) обладают значительно большими потенциальными технологическими возможностями и более высокими технико-экономическими показателями ведения технологических процессов.

Лазерная обработка существенно повышает износостойкость наплавленных покрытий. При лазерной обработке в силу больших скоростей кристаллизации, образования сильно пересыщенных растворов уменьшается количество избыточных кристаллов, их размеры. Лазерно-наплавленные слои не имеют хрупкого износа, имеют более высокотемпературную износостойкость.

Большинство строительно-дорожных машин (СДМ) оснащены механической коробкой перемены передач (КПП), которая включает в себя механизм управления КПП, выполненный в виде набора перемещаемых с помощью рычага планок и агрегатированных фиксаторов. Срок службы механизма управления КПП определяется числом включений, который при существующей технологии упрочнения рабочих поверхностей фиксатора и планки токами высокой частоты (ТВЧ) достигает 50 тыс. включений (6 тыс. часов эксплуатации), что является недостаточным.

Существует большое количество конструктивных решений, позволяющих изменить силу фиксации механизма управления КПП [11]. В основном эти решения основаны на изменении угла конуса в сторону уменьшения или за счет замены конструкции фиксатора. Эти изменения в большинстве случаев ведут к изменению всего механизма управления (полной его замене другой конструкцией), что требует включения в производственный процесс новых технологических операций, смены оборудования и увеличения себестоимости [12]. Поэтому наиболее рациональным подходом является применение лазерной обработки механизма коробки перемены передач. Режим лазерной обработки устанавливается в зависимости от типа используемого лазера. Например, для стали 45 установлен режим обработки мощным  $\text{CO}_2$  — лазером модели SpectraPhysics мощностью 5 кВт при следующих режимах: полезная мощность  $W = 3,5 \dots 4$  кВт, диаметр лазерного пятна  $d_{\text{л}} = 8$  мм, скорость транспортирования лазерного луча  $V_{\text{мод}} = 0,4 \dots 0,7$  м/мин, плотность мощности излучения  $q_0 = 30 \dots 53$  Дж/мм<sup>2</sup>, коэффициент поглощения лазерного излучения  $\eta_{\text{эф}} = 0,7$  [13]. Количество проходов равно 1.

В результате проведенного исследования установлены следующие рациональные режимы лазерной обработки, позволяющие достичь повышения надежности трансмиссии строительных машин, высокой износостойкости, коррозионной стойкости, усталостной прочности и необходимой структуры поверхностного слоя:

Режим 1. Светопоглощающее покрытие — красно-коричневая плакатная гуашь. Мощность излучения  $P = 900$  Вт, диаметр отпечатка  $D_{\text{п}} = 5,5$  мм, скорость подачи (обработки)  $V = 15,7$  мм/с.

Режим 2. Светопоглощающее покрытие — красно-коричневая плакатная гуашь. Мощность излучения  $P = 900$  Вт, диаметр отпечатка  $D_{\text{п}} = 5,0$  мм, скорость подачи (обработки)  $V = 4,6$  мм/с.

В табл. 1 и 2 представлены значения твердости и характеристики микроструктуры поверхности после лазерной обработки.

Т а б л и ц а 1

*Значения твердости и характеристики микроструктуры поверхности. Режим 1*

Расстояние между точками замера, микро-твердость, мм	Размер диагонали алмазного отпечатка, мкм	Значение микротвердости HV, кг/мм <sup>3</sup>	Примерный перевод значений HV в HRC	Микроструктура
0,1	58	572	52	Троостомартенсит игольчатой ориентации, затем троостомартенсит и трооститмартенситная сетка, которая переходит в троостоферритную и на границе с исходной структурой — в феррит
0,1	56	613	54	
0,1	59	554	51	
0,1	58	572	52	
0,15	56	613	54	
0,15	60	536	50	
0,15	63	488	47	
0,1	78	317	29	Феррит по границам крупных зерен перлита (ненормализованная структура)
0,1	81	294	27	

Т а б л и ц а 2

*Значения твердости и характеристики микроструктуры поверхности. Режим 2*

Расстояние между точками замера, микро-твердость, мм	Размер диагонали алмазного отпечатка, мкм	Значение микротвердости HV, кг/мм <sup>3</sup>	Примерный перевод значений HV в HRC	Микроструктура
0,1	57	592	53	Троостомартенсит игольчатой ориентации (игольчатость мартенсита 6...7 баллов)
0,1	58	572	52	
0,1	57	592	53	
0,2	59	554	51	
0,2	58	572	52	Троостомартенсит
0,2	56	613	54	
0,1	59	554	51	Троостомартенсит и редкие мелкие включения феррита
0,1	62	503	48	
0,1	65	456	45	
0,2	74	354	32	Феррит по границам крупных зерен перлита (ненормализованная исходная структура)
0,2	84	274	35	
0,2	84	274	35	

В нижних слоях, нагретых до более низких температур, превращение феррита идет не до конца, и образовавшийся аустенит мало насыщен углеродом. Это приводит к значительному уменьшению критической скорости охлаждения и образованию трооститной, трооститно-ферритной или ферритной сетки.

Выбор закалочной среды — один из главных факторов правильной закалики. Он осложняется тем, что (для получения идеальной кривой охлаждения, которая имеет участки различной крутизны) закалочная среда должна обеспечивать неодинаковые скорости охлаждения при различных температурах. Наиболее высокая скорость охлаждения должна быть в интервале температур 650...400 °С. В интервале температур мартенситного превращения скорость охлаждения должна быть невысокой, что предотвращает возникновение термических напряжений, способствующих образованию трещин, и в то же время не слишком низкой, чтобы не произошли отпуск мартенсита и стабилизация остаточного аустенита.

В качестве закалочных сред обычно используют кипящие жидкости, но для некоторых легированных сталей достаточная скорость охлаждения обеспечивается применением спокойного или сжатого воздуха. В связи с особенностями теплообмена при контакте нагретого металла с жидкостью интенсивность теплоотвода, а значит, и скорость охлаждения зависят от температуры металла. Это связано с тем, что при очень высоких температурах на поверхности образуется сплошная паровая рубашка, которая препятствует отводу тепла. По мере снижения температуры эта рубашка прорывается, и теплоотвод идет очень интенсивно (стадия пузырькового кипения). Ниже температуры кипения теплота отводится за счет конвекции жидкости, и интенсивность этого процесса снова резко снижается. Интервалы наиболее интенсивного теплоотвода различных жидкостей различны, поэтому выбор конкретной закалочной среды определяется видом изделия.

Поверхность твердого сплава чувствительна к плотности энергии. Существуют такая оптимальная энергия  $E_0 \ll E_n$  предельной энергии излучения, при которой на поверхности заготовки из твердого сплава не возникают дефекты, приводящие к разрушению [14]. Для всех значений энергии, расположенных между  $E_n$  и  $E_0$ , т. е. при  $E_0 < E < E_n$  на поверхности заготовки из твердого сплава могут создаваться скрытые дефекты, которые не обнаруживаются визуально, но приводят к значительному изнашиванию в процессе работы трансмиссии. Значения энергий  $E_n$  и  $E_0$  зависят как от содержания кобальта в сплаве, так и от величины зерна.

Лазерной обработке деталей коробки передач строительных машин должно предшествовать пробное упрочнение с последующей проверкой упрочненной зоны на дефектность при 10-кратном увеличении. При обнаружении дефектов в виде микротрещин плотность энергии обработки необходимо уменьшить на 0,1...0,2 Дж/мм<sup>2</sup>.

Упрочнение материалов, используемых для изготовления штампов инструмента лазерной закалкой с цианированием, дало положительные результаты. Рекомендуемый состав и режимы обработки: обмазка — 25 % железисто-синеродистого калия  $K_4Fe(CN_6)$ , связующее — клей БФ6, разведенный ацетоном (20...25 % по массе), энергия излучения 12...16 Дж [15].

Применение установленных рациональных режимов лазерной обработки заготовок из сталей и чугунов значительно увеличивает износостойкость. Лазерную обработку нормализованных или отожженных сталей рекомендуется проводить при малых скоростях (менее 15 м/с) сканирования лазерного луча. Такие же результаты получаются при лазерной обработке шестерен коробки перемены передач, рабочих поверхностей планки и фиксатора после их закалки и высокого отпуска.

Лазерная обработка может эффективно повысить фреттингостойкость мест сопряжений деталей строительных машин. Увеличение амплитуды микроремещений приводит к параболической зависимости износа от содержания углерода в стали. Для исходной поверхности оптимум соответствует стали с содержанием углерода 0,7 %. Лазерная обработка несколько смещает точку, соответствующую минимальному износу, в сторону уменьшения содержания углерода в стали (до 0,5...0,6 %). С ростом нагрузки в месте контакта повышение износостойкости проявляется еще существеннее для всех рассматриваемых сталей.

Таким образом, в результате проведенных исследований были получены наиболее рациональные режимы лазерной обработки, которые позволяют достичь обеспечения повышенной надежности деталей строительных машин, повышения фиксирующей способности за счет образования волнообразного характера упругой линии контакта, более высокой скорости нагрева и охлаждения обрабатываемого материала, а также приводят к местному изменению физико-механических и триботехнических характеристик материала, что способствует эффективности применения лазерной обработки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Harnoy A., Friedland B.* Dynamic friction model of lubricated surfaces for precise motion control // Tribology conf. New Orleans, 1993. P. 24—27.
2. *Ting L. L.* Development of a reciprocating test-rig for tribological studies of piston engine moving components // International congress. Detroit, 1993. P. 959—971.
3. *Hess D. P., Soom A.* Friction at lubricated line contact operating at oscillating sliding velocities // J. Tribol, 1990. Vol. 112. Iss. 1. P. 147—152. doi: 10.1115/1.2920220
4. *X. Zhang et al.* Effect of shielding conditions on weld properties in underwater local-dry laser welding // Proc. SPIE, 4915 (2002), p. 97—106.
5. *Renkin I. G.* The elastic range of friction // Phil Magaz. 1926. Vol. 8. P. 806—816.
6. *Lield G., Schwoecker D.* Rapid Prototyping with lasers using metal powder jets // Proc. SPIE, 5121 (2003). Pp. 399—405.
7. *Grevey D. et al.* Elaboration of functionally graded structures in laser — assisted free-form manufacturing. Ibid [10a]. Pp. 179—182.
8. *Rachoor H., Harnoy A.* Modeling of dynamic friction in lubricated line contacts for precise motion control // Tribology Transactions. 1996. Vol. 39. Iss. 2. P. 476—482. DOI: 10.1080/10402009608983555.
9. *Гаркунов Д. Н.* Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин). М. : Изд-во МСХА, 2002. 616 с.
10. *Бурлаченко О. В., Иванов М. В.* Повышение износостойкости деталей строительных машин на основе совершенствования лазерной и гидроабразивной обработки // Интернет-вестник ВолгГАСУ. 2015. Вып. 2(38). Ст. 1. Режим доступа: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>
11. *Ильицкий В. Б., Микитянский В. В., Сердюк Л. М.* Станочные приспособления. Конструкторско-технологическое обеспечение эксплуатационных свойств. М. : Машиностроение, 1989. 208 с.
12. *Бурлаченко О. В.* Технологическое обеспечение работоспособности машин : монография. Волгоград, 2002. 200 с.

13. Сердобинцев Ю. П., Бурлаченко О. В., Схиртладзе А. Г. Повышение качества функционирования технологического оборудования: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2010. 412 с.
14. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справочник / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев, А. Н. Кокора. М. : Машиностроение, 1989. 496 с.
15. Сулов А. Г. Технология машиностроения: учебник. М. : КНОРУС, 2013. 336 с.

© Бурлаченко О. В., Иванов М. В., 2016

Поступила в редакцию  
в феврале 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Бурлаченко О. В., Иванов М. В. Метод повышения надежности трансмиссии строительных машин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 121—129.

Об авторах:

**Бурлаченко Олег Васильевич** — д-р техн. наук, проф., проректор по учебно-воспитательной работе, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, oburlachenko@yandex.ru

**Иванов Максим Витальевич** — аспирант кафедры технологий строительного производства, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, clevermax18@mail.ru

**O. V. Burlachenko, M. V. Ivanov**

## METHOD OF INCREASING RELIABILITY OF TRANSMISSION OF CONSTRUCTION EQUIPMENT

The method for increasing the wearing capacity of the surface layer of details of transmission of construction equipment is proposed. The method is based on the use of laser processing with rational modes. The features of hardening of the surface layer after laser processing are considered.

**Key words:** laser processing, surface layer, microhardness, wearing capacity, radiation power, transmission.

### REFERENCES

1. Harnoy A., Friedland B. Dynamic friction model of lubricated surfaces for precise motion control. *Tribology conf.* New Orleans, 1993. Pp. 24—27.
2. Ting L. L. Development of a reciprocating test-rig for tribological studies of piston engine moving components. *International congress.* Detroit, 1993. Pp. 959—971.
3. Hess D. P., Soom A. Friction at lubricated line contact operating at oscillating sliding velocities. *J. Tribol.* 1990, 112(1), pp. 147—152. doi: 10.1115/1.2920220
4. X. Zhang et al. Effect of shielding conditions on weld properties in underwater local-dry laser welding. *Proc. SPIE*, 4915 (2002), pp. 97—106.
5. Renkin I. G. The elastic range of friction. *Phil Magaz.*, 1926, vol. 8, pp. 806—816.
6. Lield G., Schuoecker D. Rapid Prototyping with lasers using metal powder jets. *Proc. SPIE*, 5121 (2003), pp. 399—405.
7. Grevey D. et al. *Elaboration of functionally graded structures in laser — assisted free-form manufacturing.* Ibid [10a], pp. 179—182.
8. Rachoor H., Harnoy A. Modeling of dynamic friction in lubricated line contacts for precise motion control. *Tribology Transactions*, 1996, 39(2), pp. 476—482. DOI: 10.1080/10402009608983555.
9. Garkunov D. N. *Tribotekhnika (konstruirovaniye, izgotovleniye i ekspluatatsiya mashin)* [Tribotechnology (design, manufacture and operation of machines)]. Moscow, MSKha Publ., 2002. 616 p.
10. Burlachenko O. V., Ivanov M. V. [Increase of wearing capacity of details of construction equipment on the basis of improvement of laser and hydroabrasive processing]. *Internet-Vestnik VolgGASU*, 2015, no. 2(38), paper 1. (In Russ.). Available at: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>

11. Il'itskii V. B., Mikityanskii V. V., Serdyuk L. M. *Stanochnye prispobleniya. Konstruktor-sko-tekhnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnykh svoistv* [Machine devices. Design-engineering support of performance characteristics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 208 p.
12. Burlachenko O. V. *Tekhnologicheskoe obespechenie rabotosposobnosti mashin: monographiya* [Engineering support of machine operation capability]. Volgograd, 2002. 200 p.
13. Serdobintsev Yu. P., Burlachenko O. V., Skhirtladze A. G. *Povyshenie kachestva funktsionirovaniya tekhnologicheskogo oborudovaniya: monographiya* [Quality improvement of processing equipment functioning]. Staryi Oskol, TNT Publ., 2010. 412 p.
14. Rykalin N. N., Uglov A. A., Zuev I. V., Kokora A. N. *Lazernaya i elektronno-luchevaya obrabotka materialov: spravochnik* [Laser and electron beam processing of materials. Reference book]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 496 p.
15. Suslov A. G. *Tekhnologiya mashinostroeniya: uchebnyk* [Mechanical engineering. Manual]. Moscow, KNORUS Publ., 2013. 336 p.

*For citation:*

Burlachenko O. V., Ivanov M. V. [Method of increasing reliability of transmission of construction equipment]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 121—129.

*About authors:*

**Burlachenko Oleg Vasil'evich** — Doctor of Engineering Science, Professor, Vice-Rector for Studies and Educational Work, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, oburlachenko@yandex.ru

**Ivanov Maksim Vital'evich** — Post graduate student of Construction Technology Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, clevermax18@mail.ru

УДК 62-82:69.002.5

**Н. А. Фоменко<sup>а</sup>, В. И. Богданов<sup>б</sup>, О. В. Бурлаченко<sup>а</sup>, С. В. Алексиков<sup>а</sup>**

<sup>а</sup> *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

<sup>б</sup> *Волжский институт строительства и технологий (ВИСТех) — филиал ВолгГАСУ*

## **ЗАПОРНОЕ УСТРОЙСТВО ГИДРОПРИВОДА СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНЫХ МАШИН**

Разработана конструкция запорного устройства от несанкционированного выброса рабочей жидкости при разрушении рукавов высокого давления гидропривода строительно-дорожных машин

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** гидропривод, гидравлическая система, рукав высокого давления, защита гидропривода, запорное устройство.

Исследования [1—3] показывают, что гидросистема строительно-дорожных машин работает в условиях значительных колебаний наружной температуры (от  $-50$  до  $+60$  °С) и влажности окружающего воздуха (от 5 до 100 %). При этом существенно меняется температура материала и рабочей жидкости (от 30 до 60 °С). Все это ведет к ухудшению свойств материала, из которого изготовлены агрегаты гидросистемы, и снижает надежность конструкции. Увеличение мощности гидропривода за счет повышения рабочего давления нередко приводит к разрушению рукавов высокого давления и несанкционированному выбросу рабочей жидкости строительно-дорожных машин в атмосферу (46...335 л за один выброс).

Выброс в атмосферу нефтепродуктов наносит значительный ущерб экологической безопасности (фауне, флоре) [4—12], приводит к невосполнимым материальным потерям биоресурсов и др.

В защищенных гидроприводах при разрушении рукавов высокого давления потери рабочей жидкости составляют 0,5 до 10 л [1, 2]. Разработано, в том числе авторами, несколько вариантов защиты [13—20], однако не достигнута их эксплуатационная надежность. Поэтому предлагается конструкция гидропривода в строительно-дорожных машинах, которая может улучшить функциональные возможности его защиты от несанкционированного выброса рабочей жидкости.

Техническая задача решается тем, что в гидроприводе, содержащим гидробак, насос, исполнительный орган, связанный напорной гидролинией с насосом через гидроуправляемое двухпозиционное устройство, и подключенное через регулируемый дроссель к сливной гидролинии запорное устройство выполненное в виде гидроуправляемого трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя. Гидропривод дополнительно снабжен датчиком перепада давления. Датчик состоит из корпуса, содержащего полость и крышки, между которыми посредством винтового крепления зажата эластичная диафрагма, разделяющая внутренний его объем на плюсовую и минусовую камеры. В полости корпуса размещен с возможностью скольжения полый плунжер со штоком, соединенным с эластичной диафрагмой резьбовым креплением. При этом в торце плунжера со стороны крепления штока выполнены отверстия, через которые полость плунжера сообщается с плюсовой камерой датчика перепада давления. В корпусе датчика перепада давления вы-

полнены каналы: один снабженный штуцером, сообщающийся с плюсовой камерой, а другой вертикальная ось которого расположена от внутренней торцевой стенки полости корпуса датчика перепада давления на расстоянии, равном полному ходу плунжера до упора штока в крышку датчика служит управляющим сигналом. В крышке установлен регулировочный винт поджатия пружины, размещенной в минусовой камере датчика перепада давления, и канал, снабженный штуцером, сообщающийся с минусовой камерой. Гидропривод дополнительно снабжен двумя регулируемыми дросселями, один из которых установлен на напорной гидролинии после гидроуправляемого трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя, а другой регулируемый дроссель подсоединен к напорной гидролинии. Канал минусовой камеры датчика перепада давления подсоединен к напорной гидролинии после регулируемого дросселя. Гидропривод дополнительно снабжен двумя обратными клапанами, двумя вентилями и гидрозамком, управляющая полость которого соединена через один обратный клапан и штуцер с каналом управляющего сигнала корпуса датчика перепада давления, а входная полость гидрозамка подсоединена к напорной гидролинии до гидроуправляемого трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя. Выходная полость гидрозамка соединена с управляющей полостью гидроуправляемого трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя и через запорный вентиль подключена к сливной гидролинии и через другой обратный клапан соединена с управляющей полостью гидрозамка, которая подключена через запорный вентиль к сливной гидролинии.

Сущность технического решения заключается в том, что установленное на напорной гидролинии запорное устройство, выполнено в виде гидроуправляемого трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя и регулируемого дросселя в совокупности с датчиком перепада давления, состоящем из корпуса с крышкой, между которыми посредством винтового крепления зажата эластичная диафрагма, разделяющая внутренний объем датчика перепада давления на плюсовую камеру, подключенную через канал с штуцером в корпусе к напорной гидролинии до регулируемого дросселя, и минусовой камеры, подключенной через канал с штуцером в крышке к напорной гидролинии после регулируемого дросселя. Они позволяют определить перепад давления на регулируемом дросселе, установленном на напорной гидролинии, соответствующий истинному состоянию гидропривода при разрыве напорных рукавов питания исполнительного органа. Перепад давления на регулируемом дросселе, соответствующий разрыву рукавов питания исполнительного органа, служит гидравлическим управляющим сигналом для запорного устройства, которое мгновенно перекрывает напорную гидролинию, что повышает эксплуатационную надежность и эффективность системы защиты гидропривода от несанкционированного выброса рабочей жидкости при разрыве напорных рукавов.

В корпусе размещен плунжер, соединенный штоком с диафрагмой посредством резьбового крепления, полость которого каналом сообщается с плюсовой камерой, а канал управляющего сигнала расположен от внутренней торцевой стенки полости корпуса на расстоянии полного хода плунжера до упора его штока в крышку. В крышке установлен регулировочный винт поджатия пружины, который позволяет выдать сигнал из плюсовой камеры на

запорное устройство при разрывах напорных рукавов исполнительного органа. Кроме этого, размещение канала управляющего сигнала в корпусе датчика на расстоянии  $t$  от внутренней торцевой стенки полости корпуса позволит исключить ложные срабатывания гидропривода, не соответствующие истинному разрушению напорных рукавов, что повышает эксплуатационную надежность и эффективность защиты гидропривода от несанкционированного выброса рабочей жидкости при разрыве напорных рукавов.

Установленный в крышке корпуса датчика перепада давления регулируемый винт поджатия пружины, которая нагружает диафрагму, позволяет осуществить достаточно точную настройку порога срабатывания датчика перепада давления, то есть его чувствительность на перепад давления на регулируемом дросселе, установленном на напорной гидролинии. Это позволит исключить ложные срабатывания системы защиты гидропривода, например при работе исполнительного органа в холостом режиме или под малой нагрузкой и повысить универсальность гидропривода, его эксплуатационную надежность и эффективность защиты гидропривода от несанкционированного выброса рабочей жидкости из гидросистемы.

Подсоединение плюсовой камеры датчика перепада давления через регулируемый дроссель к напорной гидролинии до регулируемого дросселя, установленного на напорной гидролинии, позволит сглаживать перепад давления при включении насоса и пульсации давления в процессе перехода с рабочего режима гидропривода на холостой. Это позволит также исключить ложные срабатывания системы защиты гидропривода, что повышает эксплуатационную надежность защиты гидропривода от несанкционированного выброса рабочей жидкости при разрыве напорных рукавов.

Так как выходной сигнал датчика перепада давления может принимать из-за возможных колебаний плунжера периодически нулевое значение, когда из-за перекрытия напорной гидролинии запорным устройством — трехлинейным двухпозиционным гидрораспределителем в начале слива из напорной гидролинии в гидробак снижается перепад давления на регулируемом дросселе, плунжер, перемещаясь в исходное положение, закрывает канал управляющего сигнала в корпусе датчика перепада давления и управляющий сигнал пропадает, вызывается необходимость в его стабилизации.

Обратный клапан, установленный на линии соединения выходной полости гидрозамка с управляющей полостью гидрозамка, препятствует передаче управляющего сигнала, выдаваемого датчиком перепада давления из плюсовой камеры через канал управляющего сигнала напрямую на запорное устройство — трехлинейный двухпозиционный гидрораспределитель, так как этот сигнал может принимать переменные значения из-за возможных колебаний плунжера, перекрывающего канал управляющего сигнала в корпусе датчика перепада давления, что повышает эксплуатационную надежность системы защиты гидропривода от несанкционированного выброса рабочей жидкости при разрыве напорных рукавов.

Дополнение гидропривода двумя обратными клапанами и гидрозамком, управляющая полость которого соединена через обратный клапан с каналом управляющего сигнала корпуса датчика перепада давления, входная полость гидрозамка подсоединена к напорной гидролинии до запорного устройства (трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя), выходная полость

гидрозамка соединена с управляющей полостью трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя, а через другой обратный клапан соединена с управляющей полостью гидрозамка, что позволяет получить стабильный управляющий сигнал и его запомнить. Стабильный управляющий сигнал, необходимый для надежной работы запорного устройства (трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя), будет получен вследствие того что управляющая полость гидрозамка, после его открытия управляющим сигналом датчика перепада давления, будет запитана рабочей жидкостью со стабильным постоянным давлением напрямую из напорной гидролинии до трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя. Преобразованный таким способом управляющий сигнала датчика перепада давления для включения запорного устройства в постоянный стабилизированный управляющий сигнал, уже не связанный с состоянием и работой датчика перепада давления, будет отличаться абсолютным постоянством и стабильностью по уровню и обеспечит надежную работу запорного устройства, выполненного в виде трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя, в перекрытии напорной гидролинии и надежном сливе им рабочей жидкости из напорной гидролинии на участке между насосом и запорным устройством в гидробак, что повышает эксплуатационную надежность и эффективность системы защиты гидропривода от несанкционированного выброса рабочей жидкости при разрыве напорных рукавов.

Настройка уровня полученного стабильного управляющего гидравлического сигнала, не связанного с датчиком перепада давления, обеспечивается регулируемым дросселем, установленным на сливной гидролинии от запорного устройства (трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя). Установленный на сливной гидролинии регулируемый дроссель как нагрузочное устройство на выходе насоса при работе его на слив в аварийном состоянии гидропривода позволяет получить в напорной гидролинии на участке от насоса до трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя давление рабочей жидкости, равное необходимому значению давления управляющего сигнала в управляющей полости запорного устройства (трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя). Это позволит повысить эксплуатационную надежность работы системы защиты гидропривода, обеспечить высокую универсальность и эффективность защиты гидропривода.

Обратный клапан, установленный на линии соединения канала управляющего сигнала в корпусе датчика перепада давления с управляющей полостью гидрозамка, препятствует возможной подаче рабочей жидкости с выхода гидрозамка в канал управляющего сигнала в корпусе и далее через плюсовую камеру в напорную гидролинию в момент срабатывания запорного устройства (трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя) на слив рабочей жидкости из напорной гидролинии в гидробак, что повышает эксплуатационную надежность системы защиты гидропривода от несанкционированного выброса рабочей жидкости при разрыве напорных рукавов.

Установленные два вентиля на сливных гидролиниях рабочей жидкости из управляющих полостей гидрозамка и трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя позволят снять управляющий сигнал из их управляющих полостей после устранения повреждений напорных рукавов и привести гидросистему в исходное рабочее состояние, что повышает надежность системы защиты гидропривода.

Таким образом, предложенная в системе защиты гидропривода достаточно точная настройка порога срабатывания датчика перепада давления, то есть его чувствительность на перепад давления на регулируемом дросселе, установленном на напорной гидролинии, и схема стабилизации управляющего сигнала позволят обеспечить высокую универсальность гидропривода и его системы защиты, исключить ложные срабатывания его системы защиты, повысить эксплуатационную надежность, экологическую безопасность и в целом эффективность работы гидропривода и его системы защиты от несанкционированного выброса рабочей жидкости из гидросистемы.

Таким образом преобразование управляющего сигнала датчика перепада давления для управления запорным устройством в постоянный стабилизированный управляющий сигнал являются техническим результатом.

Техническое решение поясняется графическим материалом (рис.)

Гидропривод включает в себя гидробак 1, насос 2, исполнительный орган (на рис. не показан), связанный напорной гидролинией 3 с насосом 2 через управляемый дроссель 4, запорное устройство, выполненное в виде трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя 5, с напорной  $P$ , выходной  $F$ , управляющей  $U$  и сливной  $L$  полостями, подключенной полостью  $L$  к сливной гидролинии 6 через регулируемый дроссель 7.

Гидропривод снабжен датчиком перепада давления 8. Датчик перепада давления 8 состоит из корпуса 9 с крышкой 10, закрепленной на корпусе 9 с помощью резьбового крепления 11. Между корпусом 9 и крышкой 10 размещена эластичная диафрагма 12, разделяющая внутренний объем датчика перепада давления 8 на плюсовую  $A$  и минусовую  $B$  камеры. Кроме этого, в корпусе 9 датчика перепада давления 8 выполнена полость, в которой размещен с возможностью скольжения плунжер 13, выполненный с внутренней цилиндрической полостью  $C$  и штоком 14, соединенным резьбовым креплением 15 с диафрагмой 12. В глухом торце плунжера 13 со стороны крепления штока 14 выполнены отверстия 16, через которые полость  $C$  плунжера сообщается с плюсовой камерой  $A$  датчика перепада давления 8. В корпусе 9 датчика перепада давления 8 выполнены каналы: канал  $D$ , сообщающийся с плюсовой камерой  $A$ , снабженный штуцером 17, и канал  $E$  управляющего сигнала, снабженный штуцером 18, вертикальная ось которого расположена от внутренней торцевой стенки полости корпуса 9 на расстоянии  $t$ , равном полному ходу плунжера до упора штока 14 в крышку 10. В крышке 10 датчика перепада давления 8 выполнен канал  $K$ , сообщающийся с минусовой камерой  $B$ , снабженный штуцером 19. Крышка 10 датчика перепада давления 8 снабжена регулировочным винтом 20 и пружиной 21, размещенной в минусовой камере  $B$  между крышкой 10 и диафрагмой 12.

Гидропривод снабжен регулируемым дросселем 22. Плюсовая камера  $A$  датчика перепада давления 8 через канал  $D$ , штуцер 17 и регулируемый дроссель 22 подсоединена к напорной гидролинии 3 до регулируемого дросселя 4, установленного на напорной гидролинии. Минусовая камера  $B$  датчика перепада давления 8 через канал  $K$ , штуцер 19 подсоединена к напорной гидролинии 3 после регулируемого дросселя 4, установленного на напорной гидролинии.

Кроме этого гидропривод снабжен гидрозамком 23, с входной  $P$ , выходной  $F$  и управляющей  $U$  полостями, двумя обратными клапанами 24 и 25, двумя запорными вентилями 26 и 27. При этом управляющая полость  $U$  гид-

розамка 23 через обратный клапан 24 и штуцер 18 соединена с каналом *E* управляющего сигнала датчика перепада давления 8 и одновременно через запорный вентиль 26 подключена к сливной гидролинии 6. Входная полость *P* гидрозамка 23 подсоединена к напорной гидролинии 3 до трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя 5. Выходная полость *F* гидрозамка 23 соединена с управляющей полостью *U* трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя 5 и одновременно через запорный вентиль 27 подключена к сливной гидролинии 6, а также через обратный клапан 25 соединена с управляющей полостью *U* гидрозамка 23.

Гидропривод работает следующим образом. В рабочем состоянии гидропривода запорные вентили 26 и 27 закрыты. На весь период эксплуатации один раз регулировкой дросселя 4 и поджатием пружины 21 посредством регулировочного винта 20 датчик перепада давления 8 настраивается на максимальный перепад давления на регулируемом дросселе 4 и между камерами *A* и *B*, соответствующий движению рабочей жидкости в напорной гидролинии 3 при ее разрушении.

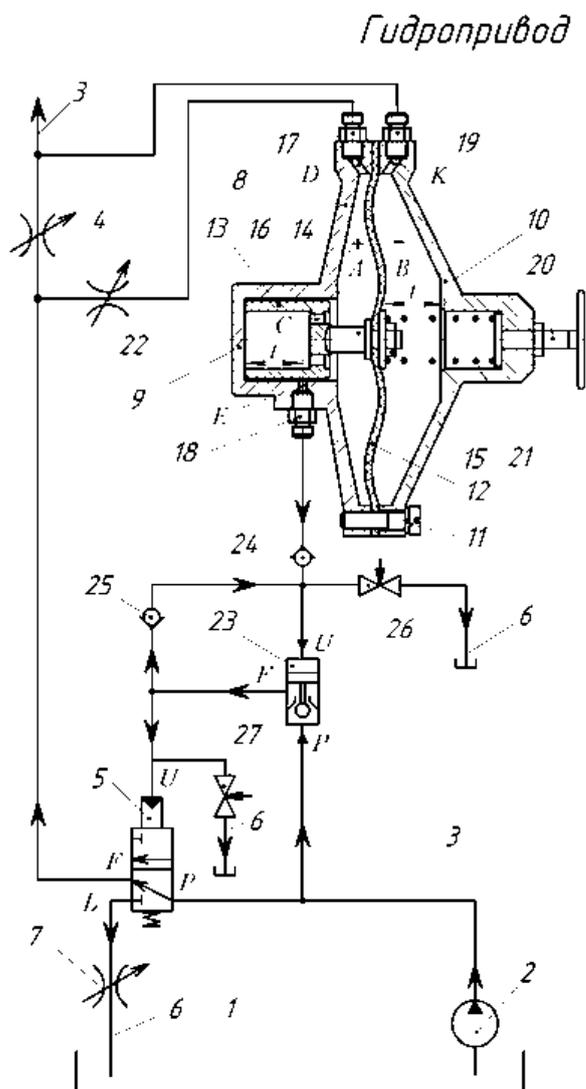
В штатном режиме работы гидропривода рабочая жидкость подается насосом 2 по напорной гидролинии 3 через напорную *P* и выходную *F* полости трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя 5, регулируемый дроссель 4 и далее — в рабочую полость исполнительного органа (на чертеже не показан). При этом поток рабочей жидкости в напорной гидролинии 3 создает перепад давления на дросселе 4 и между плюсовой *A* и минусовой *B* камерами датчика перепада давления 8. Вследствие этого усилием от разности давлений рабочей жидкости в камерах *A* и *B* плунжер 13 диафрагмой 12 посредством штока 14 будет перемещаться вправо, преодолевая усилие пружины 21.

Однако поток жидкости при рабочем и холостом ходе исполнительного органа в штатном режиме работы гидропривода создает незначительный перепад давления между камерами *A* и *B* датчика перепада давления 8. Подпор от такого перепада давления на диафрагму 12 компенсируется пружиной 21 и пружинящим воздействием самой диафрагмы.

Кроме этого, ось канала *E* управляющего сигнала в корпусе 9 датчика перепада давления 8 отстоит на достаточном расстоянии *t* от внутренней торцевой стенки полости корпуса 9, при котором левый торец плунжера 13 не доходит до канала *E*. Поэтому канал *E* при таком перепаде давления, соответствующем штатному режиму работы гидропривода, остается всегда перекрытым наружной цилиндрической поверхностью плунжера 13 и управляющий сигнал в форме давления рабочей жидкости из плюсовой камеры *A* через полость *C* плунжера 23 в канал *E* не выдается. Регулируемый дроссель 22, установленный на линии подключения плюсовой камеры *A* датчика перепада давления 8 к напорной гидролинии 3 до регулируемого дросселя 4, позволяет сглаживать пульсации перепада давления в процессе работы, а также скачек перепада давления при включении насоса 2.

При разрушении напорных рукавов питания исполнительного органа (на чертеже не показан) давление в напорной гидролинии падает и из-за существенно возросшего потока рабочей жидкости в напорной гидролинии 3 создается значительный перепад давления на регулируемом дросселе 4 и соответственно — в камерах *A* и *B* датчика перепада давления 8. Вследствие этого

усилием от разности давлений рабочей жидкости в камерах *A* и *B* плунжер *13* диафрагмой *12* посредством штока *14* будет перемещаться вправо на расстояние *t* полного хода плунжера *13* до упора его штока *14* с резьбовым креплением *15* в крышку *10* датчика перепада давления *8*, преодолевая усилие пружины *21*. При этом откроется канал *E* управляющего сигнала в корпусе *9*.



Гидропривод строительно-дорожных машин

По каналу *E* давление рабочей жидкости в плюсовой камере *A* и в полости *C* плунжера *13*, как гидравлический управляющий сигнал, передается через штуцер *18* и обратный клапан *24* только в управляющую полость *U* гидрозамка *23*. Ввиду нестабильности управляющего сигнала из-за возможных колебаний плунжера при изменениях перепада давления, передаче такого нестабильного сигнала на трехлинейный двухпозиционный гидрораспределитель *5* препятствует обратный клапан *25*.

Управляющий сигнал от датчика перепада давления 8 открывает гидрозамок 23. При этом давление рабочей жидкости из напорной гидролинии 3 насоса 2 через открытую входную полость *P* гидрозамка 23 и далее его выходную полость *F* подается параллельно через обратный клапан 25 в управляющую полость *U* гидрозамка 23 и в управляющую полость *U* трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя 5, который мгновенно перекрывает нагнетательную гидролинию 3 и одновременно сообщает напорную полость *P* с сливной полостью *L*, через которую осуществляется слив рабочей жидкости из напорной гидролинии насоса 2 через регулируемый дроссель 7 в сливную гидролинию 6 и в гидробак 1 до устранения аварийного состояния гидропривода.

После открытия гидрозамка 23 управляющим сигналом от датчика перепада давления 9 рабочая жидкость из напорной гидролинии 3 до трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя 5 насосом 2 подается во входную полость *P* гидрозамка 23, далее его выходную полость *F* и через обратный клапан 25 в управляющую полость *U* гидрозамка 23. Такая схема обратной связи гидрозамка 23 позволит получить и запомнить стабильный управляющий сигнал для включения запорного устройства (трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя) 5, уже не связанный с работой датчика перепада давления 8. Настройка уровня полученного стабильного управляющего гидравлического сигнала, не связанного с датчиком перепада давления, обеспечивается регулируемым дросселем 7, установленным на сливной гидролинии 6 от запорного устройства (трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя). Регулируемый дроссель 7, как регулируемое нагрузочное устройство на выходе насоса 2 при работе его на слив в аварийном состоянии гидропривода, позволяет регулировкой его сопротивления получить в гидролинии 3 на участке от насоса 2 до трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя 5 давление рабочей жидкости, равное необходимому значению давления управляющего сигнала в управляющей полости *U* трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя 5.

При перекрытом трехлинейном двухпозиционном гидрораспределителе 5 давление в напорной гидролинии 3 после него будет близко соответствовать атмосферному, а давление в плюсовой *A* и минусовой *B* камерах датчика перепада давления 8 будет одинаковым и плунжер 13 переместится влево усилием пружины 21 и пружинящим воздействием диафрагмы 12, закрывая канал *E* управляющего сигнала в корпусе 9.

Обратный неуправляемый клапан 24, установленный на линии соединения канала *E* управляющего сигнала датчика перепада давления 8 с управляющей полостью *U* гидрозамка 23, препятствует возможной подаче рабочей жидкости с выходной полости *F* гидрозамка 23 в канал *E* управляющего сигнала датчика перепада давления 8 и далее через плюсовую камеру *A* в напорную гидролинию 3 в момент срабатывания запорного устройства (трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя) 5 на слив рабочей жидкости из напорной гидролинии 3.

Для восстановления исходного состояния гидропривода после устранения аварийного состояния, связанного с разрушением напорных рукавов, снимается управляющий гидравлический сигнал открытием запорных вентилей 26 и 27. При этом давление в управляющих полостях *U* гидрозамка 23 и

трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя 5 мгновенно падает, а трехлинейный двухпозиционный гидрораспределитель 5 сообщает напорную полость  $P$  с выходной полостью  $F$  для подачи рабочей жидкости в исполнительный орган гидропривода и перекрывает сливную полость  $L$  слива в гидробак 1. После этого вентили 26 и 27 закрываются.

Таким образом, предлагаемое изобретение в сравнении с прототипом, повышает эффективность гидропривода и его системы защиты от несанкционированного выброса рабочей жидкости из гидросистемы, существенно повышает эксплуатационную надежность, универсальность гидропривода, что позволяет использовать его в гидроприводах с различными подачами рабочей жидкости на исполнительные механизмы, и экологическую безопасность использования гидропривода рабочих органов машин.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фоменко Н. А.* Совершенствование эксплуатационных свойств гидравлических систем машинно-тракторных агрегатов: дис... канд. техн. наук. Волгоград, 2002. 166 с.
2. *Фоменко В. И.* Разработка систем защиты гидроприводов механизмов навески тяговых и специальных транспортных машин: дис... канд. техн. наук. Волгоград, 2000. С. 4—8.
3. *Фоменко Н. А., Богданов В. И., Алексиков С. В.* Ресурсосберегающая гидравлическая система строительной техники: сб. науч. тр. по материалам Международной науч.-практ. конф. Саратов, 2014. С. 221—224.
4. *Перельмитер В. И.* Гидравлическая система: пат. SU 1822471 A3 F 15 B 20/00.
5. Система защиты гидропривода: пат. SU1813937A1F15B20/00 / Н. А. Фоменко, С. В. Дубинский, Г. И. Голобута, Г. П. Лышко.
6. Снижение энергии гидравлического удара в запорном устройстве гидросистемы строительной дорожной техники / Н. А. Фоменко, В. И. Богданов, О. В. Бурлаченко, С. В. Алексиков, Н. В. Сапожкова // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2015. Вып. 1(37). Ст. 3. Режим доступа : <http://www.vestnik.vgasu.ru/>
7. *Фоменко Н. А., Перельмитер В. И., Фоменко В. И.* Система защиты гидропривода: пат. RU15763U17F15B21/00.
8. *Фоменко Н. А., Богданов В. И., Фоменко В. И.* Трубопровод высокого давления: пат. RU 2511926 C2 Рос. Федерация МПК F 15 B 20/00 (2006.01).
9. *Богданов В. И., Фоменко Н. А., Бурлаченко О. В.* Гидропривод : пат. заявка на изобретение № 2014152575 от 26.12.2014.
10. *Фоменко В. И., Перельмитер В. И., Фоменко Н. А., Шевчук В. П.* Гидравлическая система; пат. RU 15764U17F15B21/00.
11. *Фоменко Н. А., Богданов В. И., Сапожкова Н. В.* Пути совершенствования гидропривода тягово-транспортных средств // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 218—222.
12. *Сердобинцев Ю. П., Бурлаченко О. В., Схиртладзе А. А.* Повышение качества функционирования технологического оборудования: монография. Старый Оскол : ТНТ, 2010. 411 с.
13. *Фоменко Н. А., Богданов В. И., Бурлаченко О. В.* Система защиты гидропривода. Заявка на патент № 2014133230.
14. *Фоменко Н. А., Богданов В. И., Фоменко В. И.* Трубопровод высокого давления: пат. RU 2511926 C2 Рос. Федерация МПК F 15 B 20/00 (2006.01).
15. *Фоменко Н. А., Богданов В. И., Бурлаченко О. В.* Система защиты гидропривода : заявка на патент 2014121185 ; Рос. Федерация.
16. *Фоменко Н. А., Богданов В. И., Алексиков С. В., Фоменко В. И., Богданов С. А.* Система защиты гидропривода: пат. RU 2556835 C1 Рос. Федерация МПК F 15 B 20/00 (2006.01).
17. Система защиты гидропривода / Н. А. Фоменко, В. И. Богданов, О. В. Бурлаченко, С. В. Алексиков. Заявка на изобретение № 2015122588 от 10. 06. 2015.
18. Трубопровод гидросистемы строительной дорожной машин / Н. А. Фоменко, С. В. Алексиков, В. И. Богданов, Н. В. Сапожкова // Вестник развития науки и образования. 2014. Вып. 3. С. 115—117.
19. Совершенствование гидравлической системы строительной техники / Н. А. Фоменко, В. И. Богданов, О. В. Бурлаченко, С. В. Алексиков, Н. В. Сапожкова // Вестник Волгоградского

государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2014. Вып. 38(57). С. 120—124.

20. *Фоменко Н. А., Богданов В. И., Бурлаченко О. В.* Система защиты гидропривода : заявка на патент 2014121185 ; Рос. Федерация.

© *Фоменко Н. А., Богданов В. И., Бурлаченко О. В., Алексиков С. В., 2016*

*Поступила в редакцию  
в декабре 2015 г.*

*Ссылка для цитирования:*

Запорное устройство гидропривода строительно-дорожных машин / Н. А. Фоменко, В. И. Богданов, О. В. Бурлаченко, С. В. Алексиков // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 130—140.

*Об авторах:*

**Фоменко Николай Александрович** — канд. техн. наук, доц., Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

**Богданов Виктор Иванович** — канд. техн. наук, доц., проф. кафедры технологических процессов и машин, Волжский институт строительства и технологий (ВИСТех) — филиал ВолГАСУ. Российская Федерация, 404111, г. Волжский, пр. Ленина, 72

**Бурлаченко Олег Васильевич** — д-р техн. наук, проф., проректор по учебно-воспитательной работе, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, oburlachenko@yandex.ru

**Алексиков Сергей Васильевич** — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, AL34rus@mail.ru

***N. A. Fomenko, V. I. Bogdanov, O. V. Burlachenko, S. V. Aleksikov***

## **LOCKING DEVICE OF HYDRAULIC GEAR OF CONSTRUCTION AND ROAD CARS**

The design of the locking device protecting against unauthorized emission of power liquid at the destruction of high pressure hoses of construction and road cars is developed.

**Key words:** hydraulic gear, hydraulic system, high-pressure hose, protection of the hydraulic gear, locking device.

### **REFERENCES**

1. Fomenko N. A. *Sovershenstvovanie ekspluatatsionnykh svoystv gidravlicheskikh sistem mashinno-traktornykh agregatov* [Improvement of operating properties of hydraulic systems of machine and tractor units. Cand. Eng. Sci. Diss.]. Volgograd, 2002. 166 p.
2. Fomenko V. N. *Razrabotka sistem zashchity gidroprivodov mekhanizmov naveski tyagovykh i spetsial'nykh transportnykh mashin* [Development of protection systems for hydraulic gear of devices of hinge of traction and special machines. Cand. Eng. Sci. Diss.]. Volgograd, 2000, pp. 4—8.
3. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Aleksikov S. V. *Resursoberegayushchaya gidravlicheskaya sistema stroitel'noi tekhniki* [Resource-saving hydraulic system of construction equipment. Proc. of the Int. sci.-pract. conf.]. Saratov, 2014. Pp. 221—224
4. Perel'miter V. I. *Gidravlicheskaya sistema* [Hydraulic system. Pat. RF, no. SU 1822471 A3 F 15 B 20/00].
5. Fomenko N. A., Dubinskii S. V., Golobuta G. I., Lyshko G. P. *Sistema zashchity gidroprivoda* [System of Hydraulic Control Protection. Pat. RF, no. SU 1813937A1F15B20/00].
6. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V., Aleksikov S. V., Sapozhkova N. V. [Reduce on energy hydraulic shock in lock protection device of the hydraulic system of construction and road machines]. *Internet-Vestnik VolgGASU*, 2015, no. 1(37), paper 3. (In Russ.). Available at: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>

7. Fomenko N. A., Perel'miter V. I., Fomenko V. N. *Sistema zashchity gidroprivoda* [System of Hydraulic Control Protection. Pat. RF, no. RU15763U17F15B21/00].
8. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Fomenko V. N. *Truboprovod vysokogo davleniya* [High pressure pipeline. Pat. RU 2511926 C2 Russian Federation MPK F 15 B 20/00 (2006.01)].
9. Bogdanov V. I., Fomenko N. A., Burlachenko O. V. *Gidroprivod* [Hydraulic gear. Pat. application for the invention no. 2014152575 from 26.12.2014].
10. Fomenko V. N., Perel'miter V. I., Fomenko N. A., Shevchuk V. P. *Gidravlicheskaya sistema* [Hydraulic System. Patent RF, no. RU 15764U17F15B21/00].
11. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Sapozhkova N. V. [Ways of improvement of a hydraulic actuator of traction vehicles]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2014, iss. 36(55), pp. 218—222.
12. Serdobintsev Yu. P., Burlachenko O. V., Skhirtladze A. G. *Povyshenie kachestva funkcionirovaniya tekhnologicheskogo oborudovaniya: monografiya* [Quality improvement of processing equipment functioning]. Staryi Oskol, TNT Publ., 2010. 412 p.
13. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V. *Sistema zashchity gidroprivoda* [System of protection of a hydraulic gear. Application for the invention no. 2014133230].
14. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Fomenko V. N. *Truboprovod vysokogo davleniya* [High pressure pipeline. Pat. RU 2511926 C2 Russian Federation MPK F 15 B 20/00 (2006.01)].
15. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V. *Sistema zashchity gidroprivoda* [System of protection of a hydraulic gear. Pat. application 2014121185; Russian Federation].
16. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Aleksikov S. V., Fomenko V. N., Bogdanov S. A. *Sistema zashchity gidroprivoda* [System of protection of a hydraulic gear. Pat. RU 2556835 C1; Russian Federation].
17. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V., Aleksikov S. V. *Sistema zashchity gidroprivoda* [System of protection of a hydraulic gear. Pat. application 2015122588; Russian Federation].
18. Fomenko N. A., Aleksikov S. V., Bogdanov V. I., Sapozhkova N. V. [Pipeline of the hydraulic system of construction-road machines]. *Vestnik razvitiya nauki i obrazovaniya* [Bulletin of Development of Science and Education], 2014, no. 3, pp. 115—117.
19. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V., Aleksikov S. V., Sapozhkova N. V. [Improvement of hydraulic system of construction equipment]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2014, iss. 38(57), pp. 120—124.
20. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V. *Sistema zashchity gidroprivoda* [System of protection of a hydraulic gear. Pat. application 2014121185; Russian Federation].

*For citation:*

Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V., Aleksikov S. V. [Locking device of hydraulic gear of construction and road cars]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 130—140.

*About authors:*

**Fomenko Nikolai Aleksandrovich** — Candidate of Engineering Science, Docent, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

**Bogdanov Viktor Ivanovich** — Candidate of Engineering Science, Docent, Professor of Technological Processes and Machines Department, Volzhskii Institute of Civil Engineering and Technology (VIS-Tech) — Affiliate Institute of VSUACE. 72, Lenin Prospekt, Volzhskii, 404111, Russian Federation

**Burlachenko Oleg Vasil'evich** — Doctor of Engineering Science, Professor, Vice-Rector for Studies and Educational Work, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, oburlachenko@yandex.ru

**Aleksikov Sergei Vasil'evich** — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Construction and Operation of Transport Works Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, AL34rus@mail.ru

УДК 544.6.018.47

**И. А. Куликова<sup>а</sup>, В. Т. Фомичев<sup>а</sup>, Н. А. Филимонова<sup>б</sup>**

<sup>а</sup> *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

<sup>б</sup> *Волгоградский государственный аграрный университет*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОКИСЛЕНИЯ РАСТВОРОВ БИШОФИТА В ЦЕЛЯХ ПОЛУЧЕНИЯ БАКТЕРИЦИДНЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ СТОЧНЫХ ВОД**

Приводятся данные исследований электрохимических параметров: выхода по току, затрат электроэнергии процесса электрохимического окисления растворов бишофита и хлористого натрия на постоянном токе с нерастворимыми анодами. Исследована биологическая активность полученного дезинфектанта в целях использования последнего для процессов обеззараживания сточных вод.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** электролиз, анод, плотность тока, поляризационные кривые.

В настоящее время особое значение для небольших потребителей приобретают научно-технические разработки для обеспечения очистки сточных вод, отличающиеся экологической и гигиенической безопасностью, рациональным использованием природных ресурсов, эффективностью и надежностью, удобством эксплуатации.

Среди известных окислительных методов обработки воды ведущее место принадлежит хлорированию. Относительная доступность и дешевизна жидкого хлора обусловили его широкое использование в практике водоподготовки. Однако технологические, экономические и экологические аспекты использования жидкого хлора подталкивают ученых к поискам более экономичного технического решения.

В настоящее время в качестве заменителя жидкого хлора используют хлорсодержащие реагенты, которые более безопасны и менее токсичны, чем жидкий хлор. Одним из таких реагентов является гипохлорит натрия (ГХН). Использование ГХН в качестве дезинфектанта позволяет улучшить экологическую обстановку, так как ликвидируются хранилища опасного и токсичного хлора в черте города.

Впервые опыт обработки сточных вод посредством растворов гипохлорита, получаемого методом электролиза морской воды, зафиксированы в Канаде в 1900 г., несколько позже обработка городских стоков с применением электролиза начала производиться и в США [1].

По бактерицидному действию электролитический гипохлорит натрия, особенно получаемый из подземных минерализованных или морских вод, при обеззараживании воды с высокой инициальной заряженностью не только не уступает хлору, но и нередко превосходит его.

Например, при применении гипохлорита натрия полное обеззараживание наступает при дозе по активному хлору 0,8 мг/л [2], тогда как при такой же дозе в случае обычного хлорирования эффект был бы не полным и составлял 97...98 %. Это объясняется присутствием в подземных водах соединений

брома и йода, образующих при электролизе мощные окислители, усиливающие бактерицидный эффект.

Широко известен электрохимический способ получения ГХН путем электролиза водного раствора хлорида натрия и его взаимодействия со щелочью в одном и том же аппарате (электролизере).

При малотоннажном производстве хлорсодержащих окислителей электролиз хлоридных растворов проводят без разделения электродных продуктов [3], при этом эффективность процесса несколько снижается, но значительно упрощается технологическая схема и эксплуатация электролизных установок.

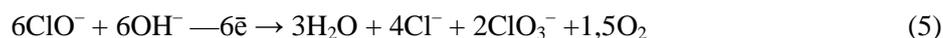
Взаимная диффузия, конвекция и миграция электродных продуктов приводит к целому ряду побочных химических процессов:

в растворе (в межэлектродном пространстве):



а также на электродах:

на аноде



на катоде



Образованная в результате гидролиза хлора хлорноватистая кислота слабо диссоциирует ( $K_d = 3,7 \cdot 10^{-8}$  при 25 °С) и, следовательно, не меняет ионного состава раствора у анода, и не может оказать влияния на процесс электролиза при разделении электродных пространств. Но если в растворе присутствуют ионы гидроксидов, то происходит нейтрализация НСлО с образованием хорошо диссоциирующей хлорноватистокислой соли (3) и равновесие реакции (9) сдвигается вправо, что способствует растворению новых количеств газообразного хлора.

Образование СлО<sup>-</sup> существенным образом влияет на дальнейший ход электролиза. Потенциал разряда СлО<sup>-</sup> значительно меньше потенциала разряда Сл<sup>-</sup>, поэтому уже при незначительных концентрациях СлО<sup>-</sup> на аноде начинается совместный разряд ионов, что снижает выход по току гипохлорита [4]. Количество разряжающихся СлО<sup>-</sup> будет увеличиваться по мере роста их концентрации их концентрации в растворе. Когда содержание гипохлорит-ионов, образующихся по реакции (3), станет равным количеству ионов разряжающихся по реакции (5), рост концентрации гипохлорита прекратится, наступит состояние равновесия, и весь ток будет расходоваться на образование хлоратов.

Таким образом, при электролизе нейтрального раствора хлорида натрия в условиях, когда вся щелочь, образующаяся на катоде, взаимодействует с хлором, выделяющимся на аноде, конечными продуктами электролиза являются гипохлорит и газообразный кислород на аноде и водород на катоде.

Весьма перспективными являются электрохимические установки, работающие на концентрированных солевых растворах [5, 6]. Такие установки целесообразно использовать при наличии близкорасположенных источников сырья, к тому же они могут располагаться в непосредственной близости от жилой застройки и вполне пригодны для замены хлораторного оборудования при реконструкции.

Волгоградская область богата уникальным минералом — бишофитом, который содержит в своем составе до 98 % хлорида магния. Это ценнейшее сырье для передела во многих отраслях: металлургии, медицины, сельском хозяйстве и др. В настоящее время данный минерал используется в природном виде, без дополнительной обработки [7].

Электрохимическая обработка растворов бишофита позволяет выявить дополнительные возможности и области его применения. В результате электрохимического окисления водных растворов бишофита образуется активный комплекс гипохлоритов, гипобромитов, обладающих значительным бактерицидным, фунгицидным, овицидным эффектом [8, 9]. Это позволяет исследовать полученный бактерицидный продукт в процессах обеззараживания бытовых, промышленных и сельскохозяйственных стоков, использовать в сельском хозяйстве для предпосевной обработки семян и внекорневой обработки растений [10].

Важнейшим фактором электрохимического процесса является зависимость выхода продукта электрохимической реакции от плотности тока, т. е. от скорости процесса, определяющего массу продукта, получаемого в единицу времени (производительность процесса).

Экспериментальные данные, представленные на рис. 1 показывают, зависимость выхода по току (ВТ) продуктов анодного окисления хлорид-ионов в пересчете на активный хлор при проведении электрохимического процесса с использованием постоянного тока.

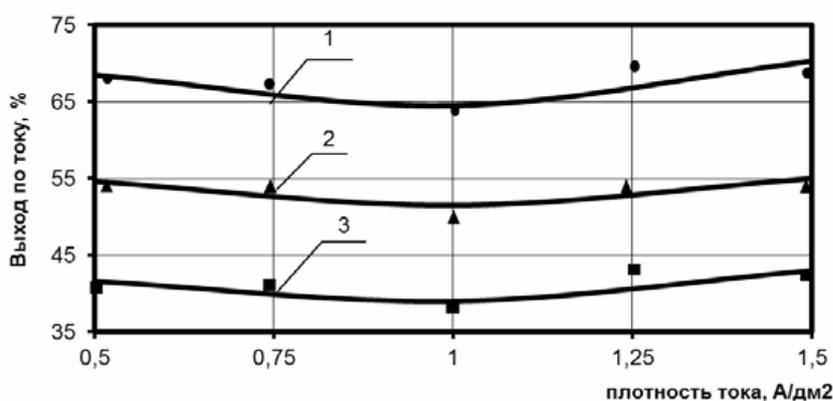


Рис. 1. Зависимость выхода по току (ВТ) активного хлора от величины плотности тока в растворах бишофита на постоянном токе. Концентрация растворов (мг-экв/л): 1 — 2,0; 2 — 1,25; 3 — 0,5. Температура раствора 25 °С

Из результатов экспериментов следует, что выход по току активного хлора зависит от плотности тока и концентрации раствора бишофита. При этом наблюдается снижение выхода по току с 75 до 53 % для концентраций 1,25...2,0 мг-экв/л с увеличением плотности тока от 0,5 до 1,5 А/дм<sup>2</sup>.

Эти данные позволяют определить удельные затраты электроэнергии (W). Графики, представленные на рис. 2, указывают на то, что энергозатраты процесса возрастают с увеличением плотности тока и концентрации исходного реагента. При этом наибольшие относительные затраты относятся к минимальной концентрации 0,5 мг-экв/л и возрастают в 2,5 раза от плотности тока 0,1...1,5 А/дм<sup>2</sup>. Минимальные затраты соответствуют концентрациям 1,25 и 2 мг-экв/л. В диапазоне плотностей тока 0,5...1,5 А/дм<sup>2</sup> энергозатраты возрастают всего в два раза.

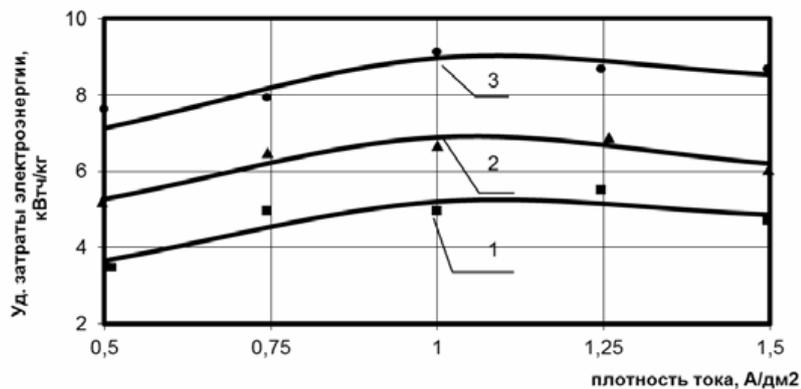
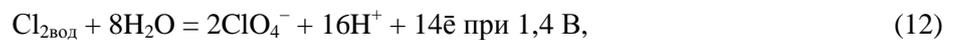
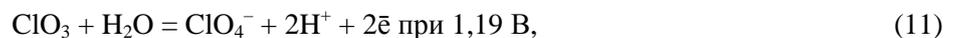


Рис. 2. Удельные затраты электроэнергии при получении дезинфеканта в растворах бишофита на постоянном токе. Концентрация растворов (мг-экв/л): 1 — 2,0; 2 — 1,25; 3 — 0,5. Температура раствора 25 °С

Для выяснения характера полученных зависимостей были сняты зависимости величины электродных потенциалов от плотности тока (рис. 3).

Ход кривых поляризации показывает закономерное смещение анодного потенциала в область положительных значений при уменьшении концентрации раствора.

Смещение анодного потенциала в область положительных значений приводит к протеканию последовательных реакций:



При этом содержание хлоридов в растворе активнее смещает (кривая 4, рис. 3) потенциал в область разложения воды и выделения кислорода, что приводит к снижению выхода по току основного продукта за счет перераспределения части электрической энергии на побочные процессы. Кривые 1—3 (рис. 3), отвечающие большей концентрации бишофита, располагаются в зоне окисления хлорид-ионов.

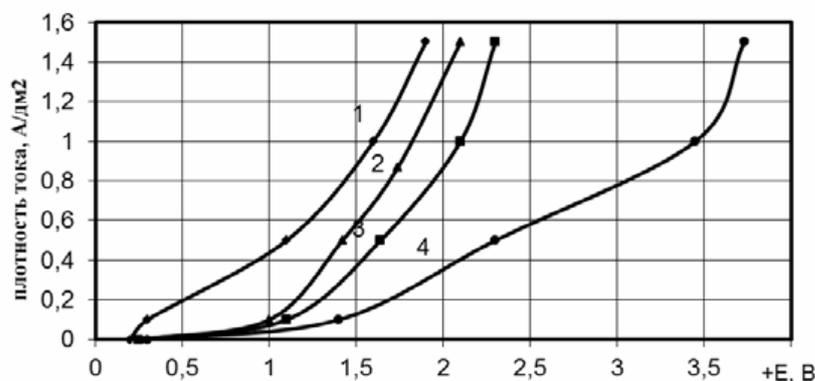


Рис. 3. Зависимость плотности тока от величины электродного потенциала анода в растворах бишофита. Концентрация растворов (мг-экв/л): 1 — 2,0; 2 — 1,25; 3 — 1,0; 4 — 0,5. Температура раствора 25 °С

Для уточнения особенностей процесса получения анодных продуктов при электролизе растворов природного бишофита необходимо сравнить его с известными на настоящее время процессами получения гипохлоритов. Самый распространенный из них — электролиз раствора хлорида натрия [11].

Данные выхода по току гипохлорита натрия (в пересчете на активный хлор) (рис. 4) из растворов хлорида натрия, равных концентрациям растворов бишофита 0,5...2,0 мг-экв/л показывают, что даже при максимальных плотностях тока и концентрации значения их ниже, чем при использовании растворов бишофита (см. рис. 1) и падают со снижением концентрации.

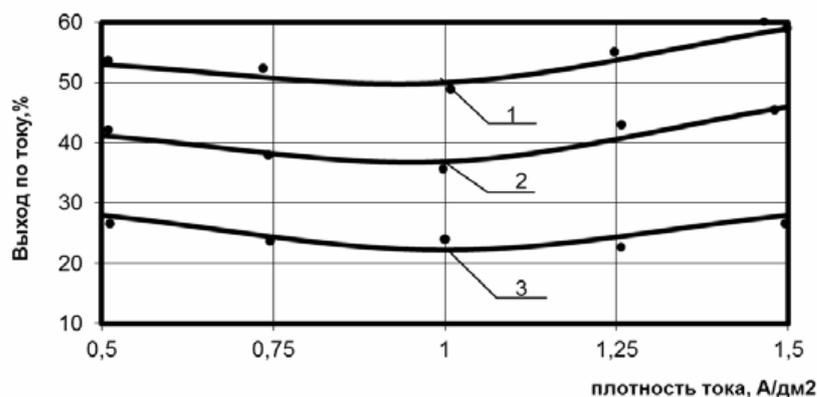


Рис. 4. Зависимость выхода по току активного хлора от величины плотности тока в растворах хлористого натрия на постоянном токе. Концентрация растворов (мг-экв/л): 1 — 2,0; 2 — 1,25; 3 — 0,5. Температура раствора 25°С

Вместе с этим удельные затраты электрической энергии (рис. 5) при электролизе растворов хлорида натрия выше, чем при использовании бишофита. Так, при плотности тока 1 А/дм<sup>2</sup> и концентрации раствора 0,5 мг-экв/л затраты составляют 14 кВтч/кг, при 1,25 мг-экв/л — 9 кВтч/кг, при 2,0 мг-экв/л 5,2 кВтч/кг.

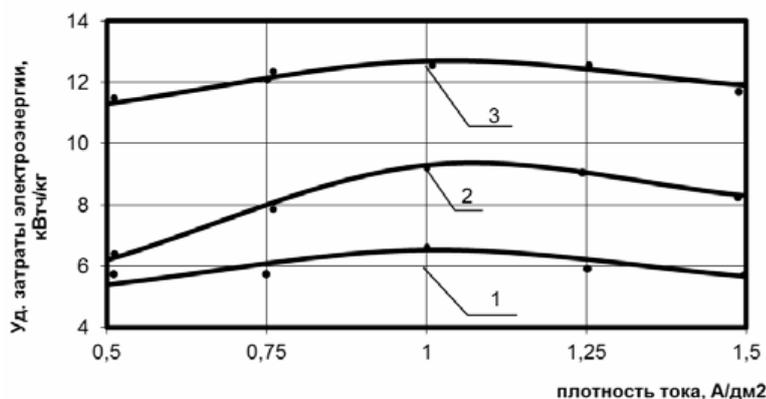


Рис. 5. Удельные затраты электроэнергии при получении гипохлорита натрия на постоянном токе. Концентрация растворов (мг-экв/л): 1 — 2,0; 2 — 1,25; 3 — 0,5. Температура раствора 25 °С

Полученный результат может быть объяснен сопоставлением поляризационных кривых, полученных в растворах хлорида натрия (рис. 6) и бишофита (см. рис. 3). Можно видеть, что в растворах бишофита кривые расположены в области более отрицательных потенциалов (например, для плотности тока 0,5 А/дм² в растворе бишофита (кривая 1) потенциал равен 1,1 В, в растворе хлорида натрия этой же концентрации — 1,4 В). В первом случае происходит совместное окисление бромид- и хлорид-ионов, при этом не достигается потенциал разложения воды, а в растворах хлорида натрия этот потенциал достигается, что является дополнительным расходом энергии, но в случае растворов бишофита — условием повышения выхода по току активного хлора.

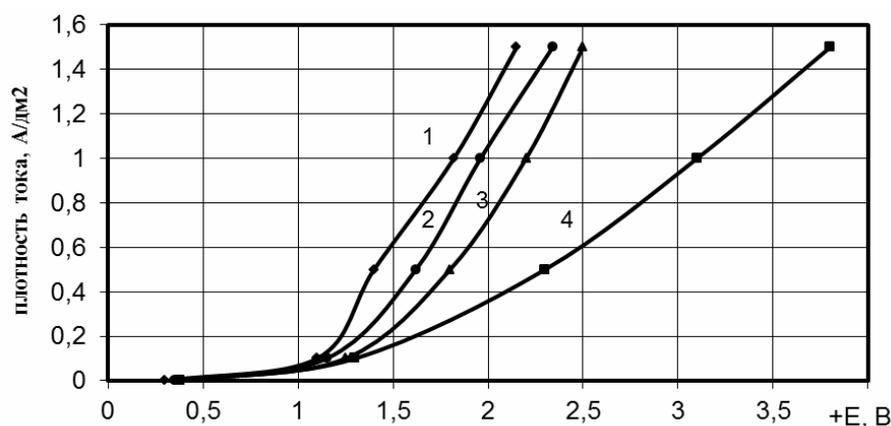


Рис. 6. Зависимость плотности тока от величины электродного потенциала анода в растворах хлорида натрия. Концентрация растворов (мг-экв/л): 1 — 2,0; 2 — 1,25; 3 — 1,0; 4 — 0,5. Температура раствора 25 °С

Очевидно, что основные особенности, присущие хлорированию воды жидким хлором, должны сохраняться и при применении дезинфектантов на основе минерального сырья. Величина свободного хлора, равная 0,3...0,5 мг/дм³ для питьевой воды и 1,5...2 мг/дм³ для сточной жидкости, как

в случае с применением жидкого хлора, так и при использовании электролитических гипохлоритов является гарантированным показателем надежности обрабатываемой воды.

При обеззараживании сточных вод окислителями, полученными из морских и слабоминерализованных вод, в обрабатываемую воду вместе с химическими продуктами будет вноситься и некоторое количество различных солей, что может сказываться на изменении солевого состава обрабатываемой воды, ее pH, жесткости и стабильности [12, 13]. Количество вводимых солей зависит от типа исходного раствора хлоридов, концентрации активного хлора в готовом продукте и требуемой дозы на обеззараживание.

Наибольшее увеличение солесодержания может наблюдаться при использовании дезинфектантов, получаемых из подземных минерализованных вод.

В связи с этим были проведены исследования изменения химического состава речной воды при обработке ее окислителем, полученным на основе бишофита, дозами по активному хлору 1 и 6 мг/л (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

*Изменение химического состава речной воды при введении дезинфектанта на основе бишофита*

Показатели	Значение показателей			Нормативы ПДК, мг/л
	До обработки	При обработке дозой по активному хлору, мг/л		
		1	6	
Содержание основных компонентов, мг/л				
Натрий	45,3	51,3	75,3	200
Кальций	40,0	41,2	46	—
Магний	9,0	9,8	13,8	—
Хлориды	6,3	17,3	61,3	350
Сульфаты	14,6	15,0	16,8	500
Жесткость общ. мг-кв/л	2,8	2,9	3,5	10,0
pH	7,9	7,93	7,98	6..9

Данные табл. 1 показывают, что даже при высоких дозах активного хлора содержание отдельных ионов в обрабатываемой воде значительно ниже пределов, нормируемых санитарными правилами и нормами.

Согласно действующим санитарным правилам по охране поверхностных вод от загрязнения, индикаторными микробиологическими показателями эффективности обеззараживания сточных вод являются:

общие колиформные бактерии как микробиологические показатели, характеризующие уровень фекального загрязнения сточных вод и степень вероятности присутствия возбудителей бактериальных кишечных инфекций;

колифаги как индикаторы вирусного загрязнения.

Для установления биологической активности и определения эффективности обеззараживания были проведены серии бактериологических анализов с использованием окислителей, полученных методом электролиза из бишофита. Экспериментальные исследования проводились на общепринятых мо-

делях бактерий и вирусов, широко распространенных в объектах окружающей среды [11, 14].

Высев кишечной палочки (*E.coli*) из экспериментальных и контрольного сосудов осуществлялся прямым поверхностным посевом на среду Эндо обычным способом с последующей инкубацией в течение 24 ч при температуре 37 °С в соответствии с [15]. Кишечная палочка (*E. Coli*) относится к роду *Escherichia*, это грам- и оксидазоотрицательная палочка, факультативный анаэроб, обладает бродильным и дыхательным типам метаболизма. Встречается как нормальная флора в нижних отделах кишечника, широко используется в качестве показателя фекального загрязнения объектов окружающей среды.

Исследования проводились при комнатной температуре в условиях естественного освещения в специальных сосудах, в которых были приготовлены различные разведения препарата на дистиллированной воде. Один сосуд был контрольным, в нем содержалась только водопроводная вода. Для инфицирования экспериментальных и контрольных сосудов перед проведением исследований готовилась суточная культура кишечной палочки. Колифаг выращивался в бульонной культуре в течение 24 часов и титровался однослойным методом для определения его исходной концентрации.

Для эксперимента исходные концентрации микроорганизмов готовились на физиологическом растворе с использованием стандарта мутности в концентрации  $10^3...10^4$  КОЕ в мл. В день эксперимента в нативный препарат, а также в его разведение 1:1 и далее в десятикратные разведения, приготовленные на стерильной водопроводной воде, вносились тест-микроорганизмы с таким расчетом, чтобы на чашке с питательной средой получить изолированные колонии, т. е. единицы и десятки колониеобразующих единиц в 0,1 мл. В дальнейшем при определении концентрации каждого микроорганизма пересчет проводился на 1 мл. После внесения тест-микроорганизмов в сосуды (контрольный и с разведениями препарата) проводился высев проб прямым посевом на соответствующие селективные питательные среды сразу после внесения (исходная), а также через сутки. Исследования проводились в трех повторах для каждого микроорганизма.

Результаты исследований по влиянию бактерицидного препарата на *E.coli* представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

*Влияние бактерицидного препарата на количество кишечной палочки, (КОЕ/мл)*

Разведение препарата	Заданное количество микроорганизмов	Время отбора проб (сутки)		
		1	2	6
$10^{-2}$	270	0	0	0
$10^{-3}$	272	0	0	0
$10^{-4}$	270	0 10	0	0
$10^{-5}$	269	42	67	78
$10^{-6}$	270	57	87	106
$10^{-7}$	270	89	150	310
Контроль	270	320	540	>540

Как следует из анализа данных, наблюдается воздействие препарата в разведении  $10^{-2} \dots 10^{-4}$  на первые сутки. Последующие разведения препарата ( $10^{-5} \dots 10^{-7}$ ) в отмеченные сроки наблюдения так же оказывали влияние на количество кишечных палочек в сравнении с контролем.

Таким образом, анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что минимальной концентрацией, оказывающей негативное действие на кишечную палочку, является разведение препарата  $10^{-6}$ . Минимальной концентрацией, которая не приводит к существенным изменениям количества *E.coli* в сравнении с контролем, является разведение  $10^{-7}$ .

Целесообразность внедрения метода электролиза бишофита в технологическую схему обеззараживания сточных вод обоснована экономической и экологической эффективностью затрат по сравнению с традиционным методом обеззараживания с использованием жидкого хлора.

Фактическая экономия обусловлена отсутствием затрат на приобретение окислителя — жидкого хлора и связанных с его использованием мер безопасности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ким А. Н., Гуссар В. А.* Совершенствование обеззараживания воды хлором, получаемым электролизом // Известия вузов. Строительство. 2001. № 1. С. 70—76.
2. *Медриш Г. Л., Тейшева А. А., Басин Д. Л.* Обеззараживание природных и сточных вод с использованием электролиза. М.: Стройиздат, 1982. 80 с.
3. Применение электрохимических процессов и аппаратов для обеззараживания воды / Л. А. Кульский, О. С. Савлук, А. В. Слипченко, В. Т. Баришполец. Киев, 1985. 41 с.
4. *Николадзе Г. И.* Технология очистки природных вод. М.: Высш. шк., 1987. 479 с.
5. *Слипченко А. В., Слипченко В. А.* Влияние анионного состава на выход хлора по току при прямом электролизе пресных природных вод // Электронная обработка материалов. 1988. № 1. С. 40—43.
6. *Слипченко А. В., Савлук О. С., Борисов Ю. С.* Влияние анионного состава электролита на выход активного хлора по току при электролизе морских и солоноватых вод // Химия и технология воды. 1987. Т. 9. № 2. С. 150—152.
7. *Салех Ахмед И. Ш.* Волгоградский бишофит. Волгоград: Перемена, 2010. 432 с.
8. Патент 2238348 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> C25B 1/26, 1/18. Способ получения гипохлорита / Фомичев В. Т., Куликова И. А. [и др.] ; заявл. 30.07.03 ; опубл. 20.10.04. Бюл. № 29.
9. *Куликова И. А., Фомичев В. Т., Древин В. Е.* Обеззараживание природных вод продуктами электролиза солевых растворов // Системные технологии продовольственного сырья и пищевых продуктов : материалы междунар. науч.-практ. конф. Москва, 2003. С. 114.
10. Патент 242515 РФ, МПК<sup>7</sup> A01C 1/00. Средство для предпосевной обработки семян / Н. А. Лаврикова., В. Т. Фомичев, М. Н. Белицкая; заявл. 07.08.2009; опубл. 27.02.2011, Бюл. № 6. 4 с.
11. Методические рекомендации по контролю и оценке вирусного загрязнения объектов окружающей среды. М., 1986.
12. *Brook A. J.* Chlorination at power plants, impact on phytoplankton production // Science. 1972. № 176. P. 1414—1415.
13. *Toetz D.* Effect of chlorine and chloramines on uptake of inorganic nitrogen by phytoplankton // Wat. Res. 1977. № 11. P. 253—258.
14. Рекомендации по методам производства анализов на сооружениях биохимической очистки промышленных и сточных вод. М.: Изд-во лит. по стр-ву, 1970. 103 с.
15. Методические указания по санитарно-микробиологическому анализу водоемов. М.: МЗ РФ, 1991.

© Куликова И. А., Фомичев В. Т., Филимонова Н. А., 2016

Поступила в редакцию  
в феврале 2016г.

Ссылка для цитирования:

Куликова И. А., Фомичев В. Т., Филимонова Н. А. Исследование процессов электрохимического окисления растворов бишофита в целях получения бактерицидных продуктов для процессов обеззараживания сточных вод // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 141—151.

Об авторах:

**Куликова Ирина Александровна** — канд. техн. наук, доц., доцент кафедры общей и прикладной химии, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, artem8448@inbox.ru

**Фомичев Валерий Тарасович** — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой общей и прикладной химии, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

**Филимонова Наталья Алексеевна** — канд. техн. наук, доц., доцент кафедры химии, Волгоградский государственный аграрный университет. Российская Федерация, 400002, г. Волгоград, пр. Университетский, 26, [nata555552007@yandex.ru](mailto:nata555552007@yandex.ru)

**I. A. Kulikova, V. T. Fomichev, N. A. Filimonova**

#### STUDY OF THE PROCESS OF ELECTROCHEMICAL OXIDATION OF BISHOFITE SOLUTION IN ORDER TO GET GERMICIDE PRODUCT FOR THE PROCESSES OF DISINFECTION OF SEWAGE

The paper presents the data of the study of electrochemical parameters: current output, power costs of the process of electrochemical oxidation of bishofite and sodium chloride solutions on steady current with insoluble anodes. Biological activity of the received disinfectant is investigated in order to use the latter in the process of disinfection of sewage.

Key words: electrolysis, anode, current density, polarization curves.

#### REFERENCES

1. Kim A. N., Gussar V. A. Improvement of water decontamination by chlorine received by electrolysis. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Construction], 2001, no. 1, pp. 70—76.
2. Medrish G. L., Teisheva A. A., Basin D. L. *Obezrazhivanie prirodnykh i stochnykh vod s ispol'zovaniem elektroliza* [Decontamination of natural and sewage waters using electrolysis]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1982. 80 p.
3. Kul'skii L. A., Savluk O. S., Slipchenko A. V., Barishpolets V. T. *Primenenie elektrokhimicheskikh protsessov i apparatov dlya obezrazhivaniya vody* [Use of electrochemical processes and devices for water decontamination]. Kiev, 1985. 41 p.
4. Nikoladze G. I. *Tekhnologiya ochistki prirodnykh vod* [Technology of purification of natural waters]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1987. 479 p.
5. Slipchenko A. V., Slipchenko V. A. [Impact of anionic composition on chlorine current efficiency at direct electrolysis of fresh natural waters]. *Elektronnaya obrabotka materialov* [Surface Engineering and Applied Electrochemistry], 1988, no. 1, pp. 40—43.
6. Slipchenko A. V., Savluk O. S., Borisov Yu. S. [Impact of anionic composition of electrolyte on active chlorine current efficiency at electrolysis of sea and brackish waters]. *Khimiya i tekhnologiya vody* [Journal of Water Chemistry and Technology], 1987, 9(2), pp. 150—152.
7. Salekh Akhmed I. Sh. *Volgogradskii bishofit* [Volgograd bischofite]. Volgograd, Peremena Publ., 2010. 432 p.
8. Fomichev V. T., Kulikova I. A. *Sposob polucheniya gipokhlorita* [Method of hypochlorite production process. Patent 2238348 Russian Federation, MPK<sup>7</sup> S25V 1/26, 1/18].
9. Kulikova I. A., Fomichev V. T., Drevin V. E. [Decontamination of natural waters by products of salt brain electrolysis]. *Sistemnye tekhnologii prodovol'stvennogo syr'ya i pishchevykh produk-*

tov : *materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [System technologies of food ingredients and food products. Proc. of Int. Sc.-Pract. Conf.]. Moscow, 2003. Pp. 114.

10. Lavrikova N. A., Fomichev V. T., Belitskaya M. N. *Sredstvo dlya predposevnoi obrabotki semyan* [Device for seed preseedling treatment. Patent 242515 RF, MPK<sup>7</sup> A01S 1/00].

11. *Metodicheskie rekomendatsii po kontrolyu i otsenke virusnogo zagryazneniya ob"ektov okruzhayushchei sredy* [Methodological recommendations on control and assessment of virus pollution of objects of the environment]. Moscow, 1986.

12. Brook A. J. Chlorination at power plants, impact on phytoplankton production. *Science*, 1972, no. 176, pp. 1414—1415.

13. Toetz D. Effect of chlorine and chloramines on uptake of inorganic nitrogen by phytoplankton. *Wat. Res.*, 1977, no. 11, pp. 253—258.

14. *Rekomendatsii po metodam proizvodstva analizov na sooruzheniyakh biokhimeskoi ochistki promyshlennykh i stochnykh vod* [Recommendations on methods of analyses process on constructions of biochemical purification of industrial and sewage waters]. Moscow, Publishing House of construction literature, 1970. 103 p.

15. *Metodicheskie ukazaniya po sanitarno-mikrobiologicheskomu analizu vodoemov* [Methodological guidelines on sanitary and microbiological analysis of water reservoirs]. Moscow, MZ RF Publ., 1991.

*For citation:*

Kulikova I. A., Fomichev V. T., Filimonova N. A. [Study of the process of electrochemical oxidation of bisphofite solution in order to get germicide product for the processes of disinfection of sewage]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 141—151.

*About authors:*

**Kulikova Irina Aleksandrovna** — Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of General and Applied Chemistry Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [artem8448@inbox.ru](mailto:artem8448@inbox.ru)

**Fomichev Valerii Tarasovich** — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of General and Applied Chemistry Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

**Filimonova Natal'ya Alekseevna** — Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Chemistry Department, Volgograd State Agricultural University. 26, Prospekt Universitetskii, Volgograd, 400002, Russian Federation, [nata55552007@yandex.ru](mailto:nata55552007@yandex.ru)

УДК 628.54.349.087:677.027

**Е. В. Москвичева, А. В. Москвичева, А. А. Геращенко, А. А. Сахарова,  
М. А. Геращенко**

*Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

### **ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ СПОСОБ ИЗВЛЕЧЕНИЯ КУБОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД КРАСИЛЬНО-ПЕЧАТНЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

Излагаются результаты исследований оптимальных условий электрохимической обработки концентратов модельных растворов и реальных стоков для выделения кубовых красителей.

К л ю ч е в ы е с л о в а: кубовые красители, концентрат.

Среди разнообразия методов электрообработки водных систем наибольшее применение в технологии обезвреживания окрашенных сточных вод имеют методы электрохимической и электрокаталитической деструкции, которые позволяют с низкими затратами качественно очищать производственные стоки для повторного их использования, а также выделять и использовать по назначению компоненты [1, 2]. В качестве основного способа выделения кубовых красителей была использована электрохимическая обработка воды постоянным током, который прежде всего отвечал минимальному загрязнению рабочей среды дополнительными реагентами.

Кубовые красители представляют собой нерастворимые в воде пигменты, которые переходят в раствор в щелочной среде при повышении температуры и в присутствии восстановителей (таких как производные сульфеновой кислоты, гидросульфит натрия, двуокись тиомочевины и др.). Имеющиеся в молекуле красителя карбонильные группы  $>C=O$  переходят под действием восстановителей в гидрохинонную форму  $\geq C=OH$ , практически нерастворимую в воде и получившую название лейкоформы (лейко — значит бесцветный; однако следует заметить, что многие лейкосоединения окрашены, так как при восстановлении электроноакцепторной карбонильной группы в электронно-донорную енольную в соединении сохраняется сопряженная система двойной связи, к тому же ионизация енольных окси-групп существенно усиливает их электропроводность). В щелочной среде гидрохинонная форма взаимодействует со щелочью с образованием натриевой соли лейкосоединения  $\geq C=ONa$ . Натриевые соли лейкосоединения кубовых красителей растворимы в воде, обладают сродством к целлюлозному волокну и хорошо выбираются ими [3, 4].

Для концентрирования сточных вод был выбран метод упаривания сточных вод красильно-печатного производства, который обеспечивает получение высококачественного дистиллята и концентрата, пригодного для дальнейшего использования [5].

Целью исследований являлось определение оптимальных условий электрохимической обработки концентратов модельных растворов и реальных стоков для выделения кубовых красителей. Определялся материал анода, время и температура обработки, концентрации  $NaOH$  и  $NaHSO_3$ . Обозначенный состав концентрата красильно-печатных производств получается при

концентрировании стоков в 10—11 раз. Дальнейшие исследования проводились из концентратов модельных растворов и реальных стоков с концентрациями компонентов, соответствующих концентрации сгущенного стока после предусмотренной в технологической схеме выпарной установки. Количество реагентов и оптимальная температура приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

*Количество реагентов и оптимальная температура*

Краситель	Порошок для крашения, г	Приготовление маточного куба			
		Вода дистиллированная, мл	Раствор едкого натра 32,5 %, мл	Гидросульфит натрия, г	Температура восстановления, °С
Кубовый желтый 3Х	0,3	200	0,3	0,1	50
Кубовый ярко-оранжевый КХ	0,55	200	0,3	0,1	50
Кубовый коричневый К	1	200	0,3	0,1	50
Кубовый ярко-зеленый 2Ж	0,3	200	0,6	0,2	60
Кубовый синий О	0,33	200	0,6	0,15	60
Кубовый алый 2Ж	0,25	200	0,6	0,2	60

Модельные растворы готовят из шести видов кубового красителя: 1) кубовый желтый 3Х; 2) кубовый ярко-оранжевый КХ; 3) кубовый коричневый К; 4) кубовый ярко-зеленый 2Ж; 5) кубовый синий О; 6) кубовый алый 2Ж. В стакан заливают воду с учетом внесения матового куба и добавляют раствор едкого натра. Раствор нагревают до оптимальной температуры восстановления красителя, добавляют гидросульфит натрия, перемешивают и затем добавляют маточный куб, смывая остатки маточного куба красильным раствором [6].

Согласно литературным данным, образующаяся для крашения хлопка натриевая соль лейко соединения ( $\geq C = ONa$ ) растворима в воде и обладает сродством к целлюлозному волокну, но при окислении кислородом воздуха (что предусмотрено технологией крашения) переходит в соответствующий нерастворимый исходный краситель (пигмент).

Поэтому эти модельные растворы окисляли кислородом воздуха, имитируя окисление при крашении в производственных условиях, что позволило доказать: при существующих исходных концентрациях кубового красителя при крашении в сточных водах не более 0,018 г/л в исходном стоке присутствует натриевая соль лейко соединения (растворенная форма) и остальное — в нерастворенном виде 0,034 г/л.

Исследуемый исходный сток имеет рН = 8,0...8,5, после концентрирования рН = 9,0...9,5. Зная, что в анодном пространстве при существующем составе стока может подвергаться электролизу только молекула воды, создавая при этом кислую среду, были проведены комплексные исследования, которые позволили рекомендовать не только требуемый состав концентрата, но и все условия максимального выделения кубового красителя.

При максимальных значениях электропроводности, минимальной вязкости и электрохимической обработке водной среды уменьшение рН раствора до 5,0...5,4 в анодном пространстве полностью переводит растворенную натриевую соль лейкосоединения в нерастворенную.

Наиболее важным условием, необходимым для успешного осуществления электрохимического процесса, является выбор материала электродов, который определяется главным образом природой исходного и конечного продуктов электрохимической реакции, а также химической устойчивостью данного электрода и его инертностью по отношению к среде, в которой происходит электролиз [7].

Основная трудность при этом возникает от того, что большинство металлов термодинамически неустойчивы в условиях анодной поляризации (происходит их растворение или пассивация). Особые условия работы анодов при электролизе разбавленных растворов NaCl связаны с тем, что на них, кроме разряда ионов хлора, происходит выделение значительного количества кислорода.

Учитывая стоимостные характеристики, в качестве анодного материала выбраны графит и нержавеющая сталь для лабораторных исследований.

Графит является высокоэлектропроводным, электрохимически активным анодным материалом [7]. Сочетание этих свойств с невысокой стоимостью обуславливает его широкое применение, представляет определенный интерес для использования в технологических системах водоочистки. Однако графитовые аноды, вследствие значительной пористости, впитывают большие количества раствора соли, поэтому действие электрического тока проявляется не только на поверхности анода, но и в самом электроде, что создает благоприятные условия для его разрушения. При этом происходит окисление («сгорание») графита продуктами электролиза, а также разрыхление его структуры выделяющимися электролитическими газами, что приводит к механическому осыпанию зерен углерода (рис. 1).

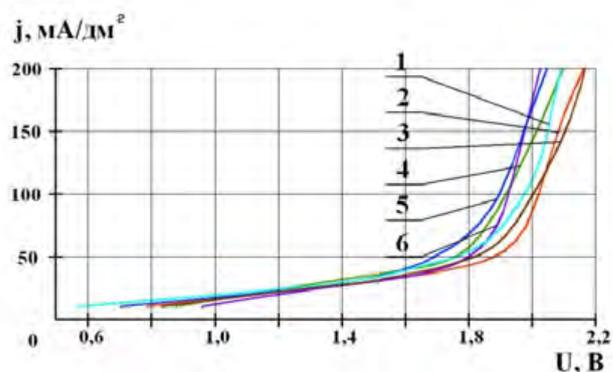


Рис. 1. Поляризационные кривые, снятые на графитовом аноде: 1 — кубовый желтый 3Х; 2 — кубовый ярко-оранжевый КХ; 3 — кубовый коричневый К; 4 — кубовый ярко-зеленый 2Ж; 5 — кубовый синий О; 6 — кубовый алый 2Ж

На графиках (рис. 1—3) мы видим, что при изменении напряжения от 0,6 до 1,6 В плотности тока в растворах красителей меняются незначительно. После 1,6 В плотности тока начинают увеличиваться. Потенциал нержавеющей

щей стали при плотностях тока от 45 до 80 мА/дм<sup>2</sup> значительно ниже потенциала графитового анода. Вследствие этого напряжения в электролизере с анодами из нержавеющей стали при одинаковой плотности тока на 0,2...0,3 В ниже, чем с графитовыми анодами, что приводит к снижению энергозатрат при осуществлении этой реакции. Определившись с материалом анода, проведем поиск оптимального соотношения площади анода к площади катода. Установлено, что наилучшим является соотношение  $S_a : S_k = 10 : 1$ . Таким образом, рекомендуемый для практического применения материал анода — нержавеющая сталь. Рабочая плотность тока 45...80 мА/дм<sup>2</sup>.

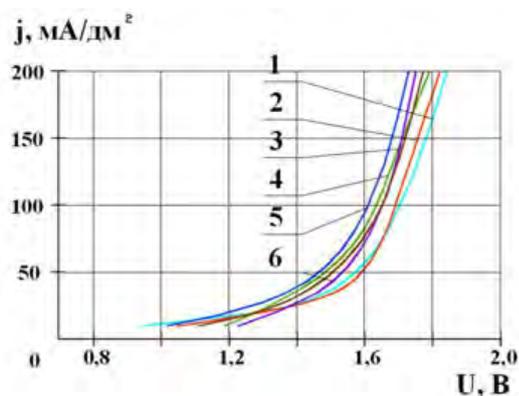


Рис. 2. Поляризационные кривые, снятые на аноде из нержавеющей стали: 1 — кубовый желтый ЗХ; 2 — кубовый ярко-оранжевый КХ; 3 — кубовый коричневый К; 4 — кубовый ярко-зеленый 2Ж; 5 — кубовый синий О; 6 — кубовый алый 2Ж

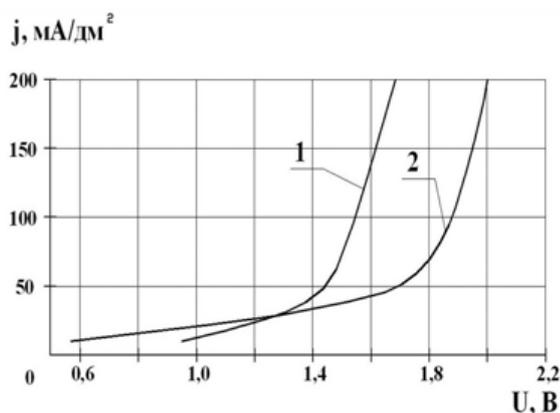


Рис. 3. Анодные поляризационные кривые в растворе смеси красителей: 1 — анод из нержавеющей стали; 2 — анод из графита

Далее определялось время электрохимической обработки, за которое достигается максимальное значение эффективности выделения кубового красителя (рис. 4).

По результатам исследований (см. рис. 4) оптимальное время электрохимической обработки составляет 20...25 мин.

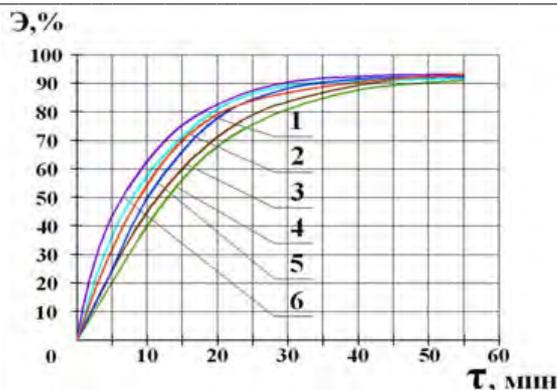


Рис. 4. Зависимость эффективности очистки от времени обработки: 1 — кубовый желтый 3Х; 2 — кубовый ярко-оранжевый КХ; 3 — кубовый коричневый К; 4 — кубовый ярко-зеленый 2Ж; 5 — кубовый синий О; 6 — кубовый алый 2Ж

Так как значение рН уменьшается, что благоприятствует переходу растворимой формы красителя в нерастворимую, реакция среды является определяющим фактором в процессе извлечения кубового красителя (рис. 5).

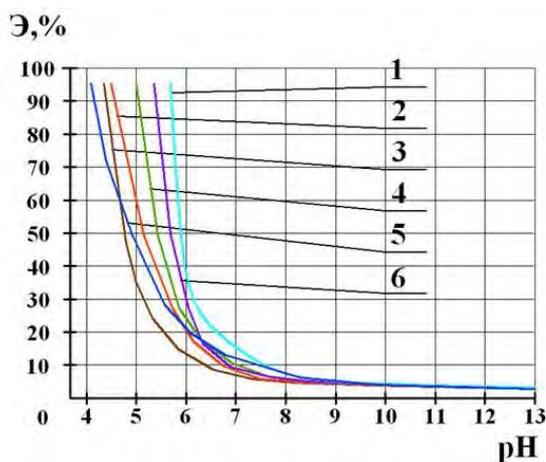


Рис. 5. Зависимость эффективности очистки от рН раствора: 1 — кубовый желтый 3Х; 2 — кубовый ярко-оранжевый КХ; 3 — кубовый коричневый К; 4 — кубовый ярко-зеленый 2Ж; 5 — кубовый синий О; 6 — кубовый алый 2Ж

Данные рис. 5 говорят о том, что чем выше рН раствора, тем больше красителя находится в виде натриевой соли лейкосоединения, т. е. в растворенном состоянии. Понижение рН приводит к переходу красителя в нерастворенное состояние.

Опытным путем определено, что максимальная эффективность (выше 90 %) перехода красителя в нерастворенную форму, достигается при рН = 5,0...5,5, что соответствует времени обработки 20...25 мин.

Как известно, с ростом температуры скорость большинства химических реакций увеличивается и может быть приближенно оценена по правилу Вант-Гоффа.

В электрохимических системах повышение температуры электролита снижает перенапряжение электродных реакций. Температурный коэффициент перенапряжения выделения водорода и кислорода составляет 2...4 мВ/°С.

Повышение температуры от 20 до 60...80 °С снижает перенапряжение этих процессов на 30...40 %, что подтверждается данными, представленными на рис. 6. Из рисунка видно, что, увеличение температуры увеличивает эффективность очистки, а это позволяет рекомендовать уменьшение времени обработки при использовании подогрева раствора на соответствующую величину. Подобное целесообразно, если приходится перерабатывать стоки объемом более 10 тыс. м<sup>3</sup>/сут, и при этом использовать вторичный пар определенных технологических процессов. Для данного исследования оптимальная температура равна 25 °С.

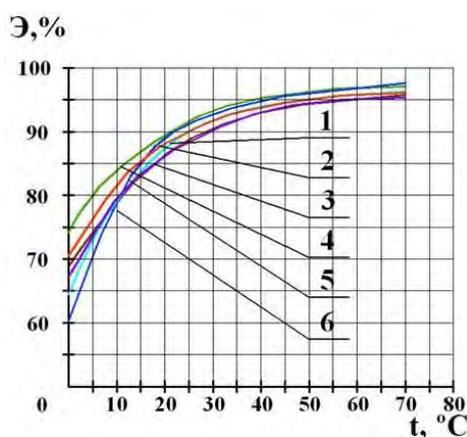


Рис. 6. Зависимость эффективности очистки от температуры сточных вод: 1 — кубовый желтый 3Х; 2 — кубовый ярко-оранжевый КХ; 3 — кубовый коричневый К; 4 — кубовый ярко-зеленый 2Ж; 5 — кубовый синий О; 6 — кубовый алый 2Ж

На рис. 7 показана зависимость эффекта очистки от исходной концентрации красителя.

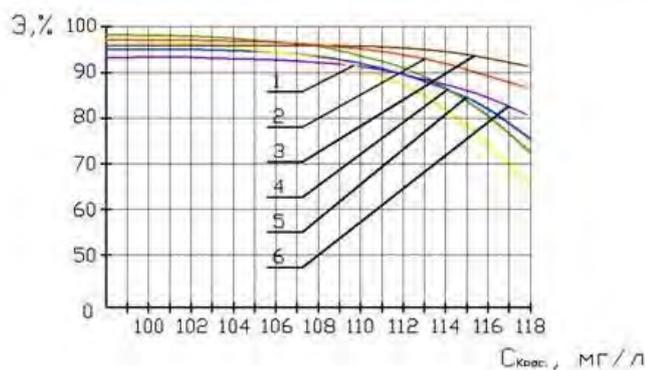


Рис. 7. Зависимость эффективности очистки от исходной концентрации красителя: 1 — кубовый желтый 3Х; 2 — кубовый ярко-оранжевый КХ; 3 — кубовый коричневый К; 4 — кубовый ярко-зеленый 2Ж; 5 — кубовый синий О; 6 — кубовый алый 2Ж

В состав концентрата входит восстановитель кубового красителя гидросульфит натрия. В работе исследовалось влияние его концентрации на эффективность очистки воды.

В процессе извлечения кубового красителя из сточной воды концентрация гидросульфита влияет на электропроводность раствора, что, в свою очередь, обуславливает эффективность очистки.

Анализируя данные рис. 8, видим, что увеличение концентрации гидросульфита натрия ведет к увеличению эффективности очистки, что вызвано увеличением электропроводности раствора, однако при концентрации 1,8 г/л эффективность очистки увеличивается незначительно. Оптимальная концентрация  $\text{NaHSO}_3$  составляет 2,0 г/л.

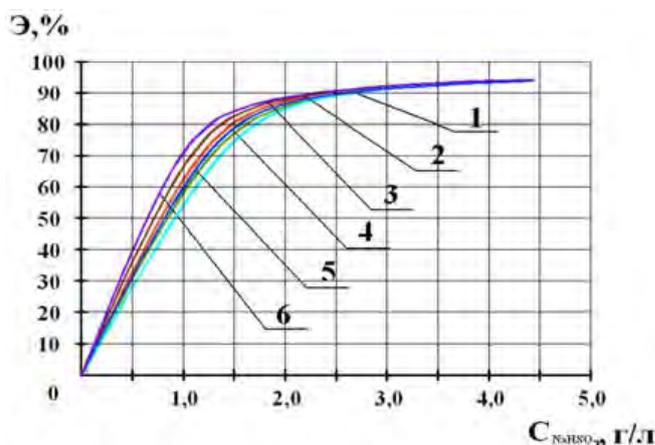


Рис. 8. Зависимость эффективности очистки от концентрации  $\text{NaHSO}_3$  раствора: 1 — кубовый желтый 3Х; 2 — кубовый ярко-оранжевый КХ; 3 — кубовый коричневый К; 4 — кубовый ярко-зеленый 2Ж; 5 — кубовый синий О; 6 — кубовый алый 2Ж

На основании проведенных исследований рекомендованы параметры электрохимической обработки концентрата стоков красильно-печатного цеха, которые представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры электрохимической обработки концентрата КПП

Номер по плану	Наименование	Величина
1	Материал анода	Нержавеющая сталь
2	Время обработки, мин	20...25
3	рН	8,0...8,5
4	Температура, °С	25
5	Плотность тока, мА/дм <sup>2</sup>	45...80
6	Концентрация $\text{NaHSO}_3$ , г/л	2,5
7	Sa : Sk	10:1

**Вывод:** проведенные исследования показали, что электрохимическая обработка концентрата сточных вод КПП, содержащих кубовые красители, это многофакторный процесс, что необходимо учитывать при разработке опти-

мального режима их выделения для дальнейшего использования в производстве. Задача оптимизации формулировалась следующим образом: добиться максимальной степени перевода красителя из сточных вод в нерастворенное состояние при минимальных плотностях тока, времени обработки, температуре и оптимальном значении рН.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Краснобродько И. Г., Светашева Е. С.* Электрохимическая очистка сточных вод. ЛИСИ, 1978. 89 с.
2. *Бондаренко А. В.* Электрохимия. М. : Химия, 1975. 675 с.
3. *Гордеева Н. В., Романова М. Г., Ратновская Е. Д.* Кубовые красители в текстильной промышленности. М. : Легкая индустрия, 1979. 205 с.
4. *Бородкин В. Ф.* Химия красителей. М. : Химия, 1981. 124 с.
5. *Таубман Е. И.* Выпаривание. М. : Химия, 1982. 328 с.
6. *Якименко Л. М.* Электродные материалы в прикладной электрохимии. М. : Химия, 1987. 183 с.
7. *Щелочкова А. А.* Разработка замкнутой системы водного хозяйства основного производства текстильного предприятия: дис... канд. тех. наук. Волгоград, 2012. 154 с.

© *Москвичева Е. В., Москвичева А. В., Геращенко А. А., Сахарова А. А., Геращенко М. А., 2016*

*Поступила в редакцию  
в декабре 2015 г.*

*Ссылка для цитирования:*

Электрохимический способ извлечения кубовых красителей из сточных вод красильно-печатных производств / Е. В. Москвичева, А. В. Москвичева, А. А. Геращенко, А. А. Сахарова, М. А. Геращенко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 152—160.

*Об авторах:*

**Москвичева Елена Викторовна** — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, [viv\\_vgasu@mail.ru](mailto:viv_vgasu@mail.ru)

**Москвичева Анастасия Владимировна** — канд. техн. наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, [viv\\_vgasu@mail.ru](mailto:viv_vgasu@mail.ru)

**Геращенко Алла Анатольевна** — канд. техн. наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, [viv\\_vgasu@mail.ru](mailto:viv_vgasu@mail.ru)

**Сахарова Анастасия Андреевна** — ассистент кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, [viv\\_vgasu@mail.ru](mailto:viv_vgasu@mail.ru)

**Геращенко Марина Александровна** — магистрант, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, [viv\\_vgasu@mail.ru](mailto:viv_vgasu@mail.ru)

***E. V. Moskvicheva, A. V. Moskvicheva, A. A. Gerashchenko, A. A. Sakharova,  
M. A. Gerashchenko***

#### **ELECTROCHEMICAL METHOD OF VAT DYES EXTRACTION FROM THE WASTEWATER OF DYEING AND PRINTING FACILITIES**

The article presents the results of studies of optimal conditions of electrochemical processing of model solution concentrates and real outflow for vat dyes.

**Key words:** vat dyes, concentrate.

---

REFERENSES

1. Krasnoborod'ko I. G., Svetasheva E. S. *Elektrokhimicheskaya ochistka stochnykh vod* [Electrochemical purification of sewage]. LISI Publ., 1978. 89 p.
2. Bondarenko A. B. *Elektrokhimiya* [Electrochemistry]. Moscow, Khimiya Publ., 1975. 675 p.
3. Gordeeva N. V., Romanova M. G., Ratnovskaya E. D. *Kubovye krasiteli v tekstil'noi promyshlennosti* [Vat dyes in textile industry]. Moscow, Legkaya industriya Publ., 1979. 205 p.
4. Borodkin V. F. *Khimiya krasitelei* [Chemistry of dyes]. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 124 p.
5. Taubman E. I. *Vyparivanie* [Vaporation]. Moscow, Khimiya Publ., 1982. 328 p.
6. Yakimenko L. M. *Elektrodnye materialy v prikladnoi elektrokhimii* [Electrode materials in applied electrochemistry]. Moscow, Khimiya Publ., 1987. 183 p.
7. Shchelochkova A. A. *Razrabotka zamknoy sistemy vodnogo khozyaistva osnovnogo proizvodstva tekstil'nogo predpriyatiya* [Development of a closed-circuit system of water services of shop floor production of a textile enterprise. Diss. Cand. Eng. Sci.]. Volgograd, 2012. 154 s.

*For citation:*

Moskvicheva E. V., Moskvicheva A. V., Gerashchenko A. A., Sakharova A. A., Gerashchenko M. A. [Electrochemical method of vat dyes extraction from the wastewater of dyeing and printing facilities]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 152—160.

*About authors:*

**Moskvicheva Elena Viktorovna** — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [viv\\_vgasu@mail.ru](mailto:viv_vgasu@mail.ru)

**Moskvicheva Anastasia Vladimirovna** — Candidate of Engineering Science, Docent of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [viv\\_vgasu@mail.ru](mailto:viv_vgasu@mail.ru)

**Gerashchenko Alla Anatol'evna** — Candidate of Engineering Science, Docent of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [viv\\_vgasu@mail.ru](mailto:viv_vgasu@mail.ru)

**Sakharova Anastasiya Andreevna** — Assistant of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [viv\\_vgasu@mail.ru](mailto:viv_vgasu@mail.ru)

**Gerashchenko Marina Aleksandrovna** — Master's Degree Student, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [viv\\_vgasu@mail.ru](mailto:viv_vgasu@mail.ru)

УДК 504.5:697.98:628.511.1

**В. Н. Азаров, С. А. Кошкареев**

*Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СТРОЙИНДУСТРИИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ СИСТЕМ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСНОГО ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА ПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ**

Рассмотрен вопрос повышения экологической безопасности стройиндустрии при помощи совершенствования систем обеспыливания с использованием комплексного дисперсионного анализа пылевых выбросов пыли системами аспирации. В предложенных конструкциях устройств мокрой очистки фактически реализована двухступенчатая схема очистки пылегазовых потоков с применением инерционно-гравитационного механизма сепарации пыли и доулавливанием остаточного ее количества при активном аэробарботировании через слой воды. В статье рассмотрен перспективный подход к совершенствованию методов комплексного дисперсионного анализа пыли, приняты среднегеометрическая (средневзвешенная) скорость частиц  $u_{p50}$  и функция распределения частиц по скоростям витания частиц пыли исследуемого образца пробы. При разработке новой конструкции пылеуловителя были использованы результаты комплексного дисперсионного анализа, выходными данными которого приняты скорости витания частиц. Степень проскока улавливаемой пыли в устройстве предложенной конструкции, на которую был получен патент РФ, определялась экспериментально. Предложенная конструкция пилотной промышленной установки мокрой очистки пылегазовых потоков систем обеспыливания прошла успешные испытания в стройиндустрии. На основе обработки результатов промышленного эксперимента получена регрессия для коэффициента проскока частиц мелкодисперсной пыли в изученном пылеулавливающем устройстве как функция ряда его параметров для исследованной аэродинамической области режимов его работы. Результаты исследований показали, что предложенные конструкции устройства мокрой очистки позволяют значительно сократить объем выбросов пыли в атмосферу при производстве стройматериалов. Даны рекомендации к применению результатов выполненной работы для дальнейшего совершенствования пылеулавливающих аппаратов аспирационных выбросов стройиндустрии, так как наблюдается снижение проскока улавливаемых пылевых частиц в обеспыливающем оборудовании систем аспирации. Повышение экологической безопасности производства ряда дисперсно-сыпучих строительных материалов при снижении объема выбросов пыли является одним из наиболее эффективных способов реализации природоохранных мероприятий.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** пыль, цемент, песок, пылеуловитель, мокрая очистка, стройматериал, проскок, дисперсионный анализ, скорость, витание, выброс, атмосфера, система, обеспыливание, аспирация.

В последнее время весь строительный комплекс, строительство и производство строительных материалов динамично развиваются. При этом наблюдается устойчивая тенденция роста объемов строительства жилья, электроэнергетических и других объектов муниципального и городского хозяйства, включая сооружения различного назначения транспортной структуры (дороги, автозаправочные комплексы, системы теплогазоснабжения и т. п.). Значительное увеличение объемов строительства определяет соответствующий рост объемов добычи сырьевых компонентов (песка, глины, щебня) и производства строительных материалов (цементов, строительных смесей, бетонов и заполнителей). Так, например, количество произведенного цемента в стране в 2014 г. составило около 70 млн т. В 2015 г. общий объем цемента, произведе-

денного в России, составил около 75 млн т, и по оценкам экспертов будет продолжать расти в количестве около 8 % в год<sup>1</sup>.

Весь спектр строительных материалов, изделий и продукции стройиндустрии отличаются значительным разнообразием, как и их производство. Невозможно кратко описать все существующее разнообразие и особенности технологий стройиндустрии. Описание технологий производства, в которых получают или обращаются дисперсно-сыпучие продукция и компоненты, например, в производстве цемента, представлено в литературе<sup>2</sup> [1—4]. У данных производств есть сходные технологические операции: прием и перегрузка сырья в склады, бункеры, дозаторы для последующего использования в процессе, полное или частичное дробление (измельчение), механическое транспортирование твердых дисперсных материалов (конвейеры и транспортеры различных типов) в узлы погрузки, хранение в бункерах-силосах, наличие бункеров-смесителей и грануляторов, термообработка в устройствах сушки и обжига с последующим остыванием готовой продукции до требуемой температуры и влажности. Конечными стадиями производства являются складирование, упаковка и отгрузка готовой продукции. При этом в объеме данного технологического оборудования и местах работы узлов транспортирования и перегрузки выделяется значительное количество мелкодисперсной пыли, попадающей в системы аспирации, которыми они оснащаются [5—7].

Для уменьшения выбросов пыли в атмосферный воздух урбанизированных территорий с высокой плотностью жилой застройки при производстве строительных материалов и конструкций необходимо использовать в обеспыливающих системах аспирации высокоэффективное пылеулавливающее оборудование. Использование сухих инерционных пылеуловителей типа ВЗП, устройств фильтрующе-взвешенного слоя и мокрой очистки пылегазовых потоков от дисперсной фазы, а также комбинированное их применение с достижением незначительной приемлемой величины степени проскока улавливаемых частиц в обеспыливающих системах аспирации является в настоящее время одним из наиболее эффективных способов предотвращения техногенного загрязнения атмосферы [7—10].

Реконструкция и замена устаревших существующих пылеуловителей и систем аспирации в сравнении с переоснащением производства и полной модернизацией всего технологического процесса и оборудования с точки зрения экономики является значительно менее затратным природоохранным мероприятием.

В последние годы и настоящее время проводятся исследования дисперсионного состава частиц пыли, в том числе с использованием микроскопиче-

---

<sup>1</sup> Статистика производства продукции России // URL: [marketing1.ru/rus4.html](http://marketing1.ru/rus4.html) (дата обращения: 01.10.2015);

«Перспективы. Электронный журнал». Мировая цементная промышленность.// URL: [perspektivy.info/book/mirovaja\\_cementnaja\\_promyshlennost\\_2012-06-06.htm](http://perspektivy.info/book/mirovaja_cementnaja_promyshlennost_2012-06-06.htm) (дата обращения: 01.10.2015).

<sup>2</sup> Технология производства цемента // URL: [base.safework.ru](http://base.safework.ru). (дата обращения: 01.10.2015).

Новый справочник химика технолога. Технология производства цемента// URL: [chemanalytica.com/book/novyuy\\_spravochnik\\_khimika\\_i\\_tekhnologa/10\\_protsesty\\_i\\_apparaty\\_khimicheskikh\\_tekhnologiy\\_chast\\_II/7192](http://chemanalytica.com/book/novyuy_spravochnik_khimika_i_tekhnologa/10_protsesty_i_apparaty_khimicheskikh_tekhnologiy_chast_II/7192).

ского метода [11—15]. В работе [11] для оценки дисперсного состава проб пыли с размером частиц порядка  $10^{-9}$  м в различных средах использовалось сочетание электронной и световой микроскопии. В статье [12] приведены результаты дисперсионного анализа микроскопическим методом элементного состава пыли в селитебной зоне среднестатистического города в Испании. В работе [13] описано исследование взрывоопасных свойств частиц с использованием дисперсионного анализа и состава пыли угля с использованием специальной модификации камеры Siwek 20-L. Установлено влияние сопла пространственного распыления, приводившего к изменению эквивалентной величины диаметра частиц угля на 20 % по сравнению с исходными образцами пыли. Следует особо отметить новое фундаментальное издание [14], где уделяется значительное внимание современным методикам дисперсионного анализа с использованием микроскопического метода и функциям интегрального распределения частиц пылей. В [15—19] авторы исследовали гидродинамику движения очищаемого пылегазового потока в аппаратах сухой и мокрой очистки, а также свойства пыли и предложили характеризовать размер частиц понятием эквивалентных размеров, или гидравлической крупности. В работах [1, 20] также было предложено характеризовать частицы пыли не только эквивалентной гидравлической крупностью  $\tau$ , но и величиной средне-медианной эквивалентной гидравлической крупности  $\tau_{50}$ , а также величиной интегрального распределения эквивалентной гидравлической крупности  $D(\tau_{50})$ . При этом, например, в [1, 21, 22] указано на некоторые недостатки микроскопического метода дисперсионного анализа, снижающие точность определения эквивалентных размеров (гидравлической крупности) и интегрального распределения эквивалентной гидравлической крупности  $D(\tau_{50})$  и некоторые пути их преодоления.

Результаты дисперсионного анализа должны быть использованы для разработки устройств инерционной очистки пылегазовых потоков (сухой и мокрой). Анализ литературы по сухой инерционной и мокрой очисткам выбросов системами обеспыливания локальной вытяжной вентиляции указывает также, что в последние годы не ослабевает научный интерес к теоретическому описанию процессов пылеочистки выбросов в вытяжных вентиляционных системах и устройствах. Разработаны новые устройства очистки на основе результатов проведенных исследований, например, аппаратов на встречно-закрученных потоках (ВЗП). В [23] представлены результаты численного моделирования движения частиц пыли в закрученных потоках с целью определения влияния комплекса геометрических параметров на эффективность улавливания пыли в ВЗП для исследованной области аэродинамических режимов.

Обеспыливающие системы аспирации оснащаются двумя и более ступенями пылеочистки выбросов [6, 7]. Последовательная установка нескольких аппаратов сухой инерционной и мокрой очистки, рукавных фильтров определяет значительные величины суммарного аэродинамического сопротивления таких систем [6, 7]. Подход к очистке аспирационных выбросов определяется в том числе общей методологией последовательного снижения концентраций очищаемого пылегазового потока от ступени-аппарата к аппарату и имеет достаточно высокие показатели по энергоемкости и стоимости при сложности эксплуатации [6, 7].

Кроме разработки новых конструкций пылеуловителей центробежно-инерционных пылеуловителей с сухим способом сепарации и многоступенчатых очистных систем с последовательной их установкой ведутся работы по совершенствованию других типов пылеулавливающих устройств на основе экспериментальных исследований и методов компьютерного моделирования гидроаэродинамики потоков, например [24—26].

Так, в работах [24, 25] представлены результаты моделирования аэрогидродинамики движения очищаемого от пыли газопылевого потока в скруббере, выполненной с использованием ЭВМ, для расчета эффективности пылеулавливания. В [25] был использован метод, описанный в [24], применительно к аппарату, конструктивной особенностью которого является соединение циклона прямоточного типа и скруббера. Экспериментально получена зависимость эффективности улавливания частиц при эксплуатации в исследованных аэродинамических режимах. Предложенная конструкция вихревого скруббера имела высокую эффективность сепарации пыли и хорошее соответствие с результатами, рассчитанными по модели описания, при приемлемых приведенных затратах (монтаж и эксплуатация).

В [26] выполнено численное моделирование (CFD) движения потоков в устройстве с определением интенсивности крутки потока в зависимости от вязкости жидкости, эффективности улавливания и аэродинамических потерь давления в гидроциклоне.

Целью [27] являлась оценка эффективности улавливания аэрозоли золы в абсорбере тарельчатого типа предложенной конструкции из газопылевого потока в слое абсорбента (воды). Результаты экспериментального исследования показали приемлемо высокую эффективность сепарации золы из пылегазового потока в предложенном пылеуловителе — абсорбере.

Проведенный анализ небольшой части литературы последних лет указывает на неослабевающее внимание исследователей к совершенствованию методик дисперсионного анализа частиц пыли и практическому приложению его результатов, которые служат основой для разработки новых устройств мокрой очистки пылегазовых потоков [6, 8, 21, 22, 28, 29]. Такие пылеуловители позволяют в значительной степени снизить проскок мелкодисперсных фракций пыли, содержащихся в значительном количестве в выбросах систем аспирации стройиндустрии [8, 22, 28, 29]. При этом непосредственное экспериментальное изучение степени проскока частиц в аппаратах мокрой очистки в обеспыливающих системах аспирации является в настоящее время наиболее точным методом исследования с получением воспроизводимых результатов. Появление новых конструкций, например [30], разработанной в ВолгГАСУ, требует дальнейшего изучения процессов сепарации в таких устройствах, включая численное моделирование CFD. Повышение экологической безопасности предприятий по производству стройматериалов, использующих, как правило, в технологическом цикле производства сыпучее сырье, материалы и продукты различной степени дисперсности является актуальным не только в настоящее время. При ожидаемом росте объемов выпуска продукции стройиндустрии в перспективе требуется интенсификация темпов снижения выбросов в атмосферу. Такие устройства мокрой очистки [30] имеют незначительную степень проскока дисперсных фракций пыли  $PM_{10}$  и

PM<sub>2,5</sub> и находят все большее практическое и эффективное применение в промышленности и стройиндустрии.

С целью повышения экологической безопасности предприятий по производству стройматериалов особое место отводится задаче совершенствования методологии и получения более точных результатов дисперсионного анализа частиц пыли. В ВолгГАСУ были разработаны и использованы в практике лабораторные установки [31, 32], которые позволили в значительной степени повысить точность результатов дисперсионного анализа, а также изменить сущность выходных данных эксперимента.

Некоторая часть частиц пыли, получающих заряд при движении в воздухе седиментационной трубки установки [31], может осаждаться на ее поверхности. Электростатические силы возникают при трении частиц о воздух в седиментационной трубке. Влияние данного эффекта усиливается, если седиментационный элемент (трубка) выполнен из диэлектрического материала (стекла). В установке [32] седиментационный элемент был выполнен из металла в форме диффузора и заземлялся для снижения влияния электростатических сил притяжения и оседания на его стенках. Совокупность ряда элементов модификации устройства [32] позволяет существенно снизить временное отложение и налипание на поверхность стенок диффузора частиц пыли, что в определенной степени повышает достоверность результатов дисперсионного анализа пыли. Кроме того, нами были изменены и физические параметры выходных данных эксперимента. В качестве функции отклика были приняты среднемедианные (средневзвешенные) скорости частиц  $u_{p_{50}}$  и функция распределения частиц по скоростям витания — «ансамбля» частиц исследуемого образца пробы пыли  $D(u_{p_{50}})$ .

В [33] рассмотрены пути преодоления известных трудностей моделирования, т. е. масштабирования пылеуловителей с использованием методов и специальных технических решений их реализации. Кроме применения одного из способов увеличения производительности устройств, их масштабируют при увеличении числа исследованных в лабораторной модели аппарата ячеек фиксированного характерного геометрического размера. В качестве такого параметра используется диаметр ячейки  $D_{я}$ , или для устройства [30] — диаметр контактной камеры  $D_{к}$ .

Если исследуемый образец пробы пыли характеризовать среднемедианной (средневзвешенной) скоростью витания частиц  $u_{p_{50}}$  и функцией распределения частиц по скоростям витания — ансамбля частиц, то для достижения масштабного перехода с увеличением производительности аппарата от лабораторной до промышленной установки соотношение аэродинамических характеристик имеет вид

$$\frac{u_{p_{50}}}{v_{км}} = \frac{u_{p_{50}}}{v_{кпу}} = \text{const}, \quad (1)$$

где  $u_{p_{50}}$  — величина среднемедианной (средневзвешенной) скорости частиц пыли исследуемого образца пробы;  $v_{км}$  — величина среднерасходовой скорости газов в контактной камере на модели устройства;  $v_{кпу}$  — величина

среднерасходовой скорости газов в контактной камере на промышленном устройстве.

Использование соотношения (1) позволяет избежать использования критерия Рейнольдса для частицы  $Re_{ч}$ , в котором используется диаметр частицы  $d_{ч}$ , точность определения которого классическим микроскопическим методом дисперсионного анализа ниже, чем метода, упомянутого выше, с комплексной методикой и определением собственно скорости витания частиц  $u_p$ .

**Постановка задачи исследования.** Проведенные успешные испытания устройства очистки газов [30], результаты которых приведены в [8, 33], привели к разработке нового устройства [34]. Целью разработки [34] было улавливание пыли из пылегазового потока в обеспыливающих системах аспирации в устройстве, в котором реализована двухступенчатая очистка с использованием инерционно-гравитационного механизма сепарации пыли и активного аэробарботирования в слое воды. Для увеличения надежности работы устройства при незначительном суммарном проскоке улавливаемых частиц пыли в контактных камерах цилиндрического типа установлена сферическая насадка [34]. Результатом исследований, проведенных в Волгоградском государственном архитектурно-строительном университете, явилась разработка нового устройства мокрой очистки пылегазовых потоков. Успешные опытно-промышленные испытания данного аппарата были проведены в системе обеспыливания выбросов аспирации на одном из заводов производства стройматериалов (ЖБИ).

**Описание исследования и результаты.** Установка и методика проведения эксперимента были аналогичны ранее рассмотренному в [34], где и были достаточно подробно описаны. К исследованию были приняты следующие определяющие факторы:

$$\varepsilon_{сн} = \frac{V_k - V_n}{V_k} \text{ — порозность слоя сферической насадки в контактной}$$

камере  $\varepsilon_{сн}$ , определяемого как отношение разности внутреннего объема контактной камеры  $V_k$ , в котором размещалась насадка, и суммарного объема сферической насадки  $V_n$ , отнесенного к  $V_k$ , внутреннему объему контактной камеры; изменялась в интервале от 0,333 до 0,650, при относительной порозности

$$\varepsilon_{сн} = \frac{\varepsilon_{сн} - \varepsilon_{сн0}}{\Delta\varepsilon_{сн}}, \text{ изменявшейся от 1,0526 до 2,0526;}$$

$$\bar{h}_{жк} = \frac{\bar{h}_{жк0}}{h_k} \text{ — уровень жидкости в конфузоре } \bar{h}_{жк}, \text{ отсчитываемый от вы-}$$

соты расположения центра нижней сферической насадки в контактной камере  $\bar{h}_{жк0}$ , отнесенный к высоте конфузора,  $h_k$ , который варьировался от  $-0,5$  до  $0$ ;

$$\overline{Re}_k = \frac{Re_k}{Re_{кр}} \text{ — значение критерия Рейнольдса в поперечном сечении кон-}$$

тактной камеры  $Re_k$ , отнесенное к значению критерия Рейнольдса для начала образования квадратичного режима течения потока,  $Re_{кр} = 10\,000$ .

Определяющие факторы, влияющие на степень проскока частиц пыли в новой модификации устройства мокрой очистки, имели вид:

$$x_1 = \frac{\bar{\varepsilon}_{\text{сн}} - \varepsilon_{\text{сн}0}}{\Delta \varepsilon_{\text{сн}}}, \quad x_2 = \frac{\bar{h}_{\text{жк}} - h_{\text{жк}0}}{\Delta h_{\text{жк}}}, \quad x_3 = \frac{\bar{\text{Re}}_{\text{к}} - \text{Re}_{\text{к}0}}{\Delta \text{Re}_{\text{к}}}. \quad (2)$$

Основу установки составил аппарат предложенной конструкции в полномасштабном (М 1:1) исполнении с сохранением геометрических размеров, соотношений и форм реального (промышленного) устройства. Размеры пилотного устройства, на котором проводился промышленный эксперимент, составляли: высота установки — 2,5 м, диаметр — 300 мм. Диаметр цилиндрических контактных камер равен 80 мм при высоте 800 мм [34]. В качестве рабочей жидкости в устройстве использовалась вода.

На рис. 1 и 2 представлены результаты исследования промышленного эксперимента на пилотной установке, характеризующие вариативность величины проскока пыли в аппарате в исследованном диапазоне рабочих аэродинамической области его работы.

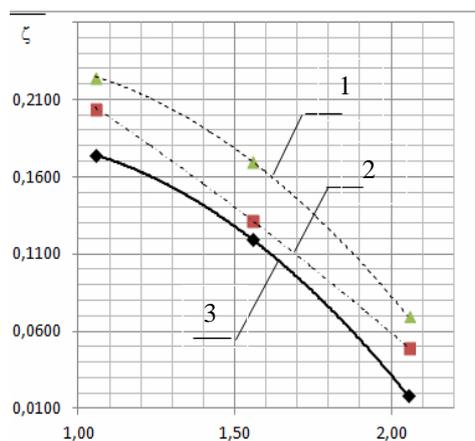


Рис. 1. Изменение степени проскока пыли  $\zeta$  при уровне жидкости в конфузоре, равном  $-0,25$ , в зависимости от относительной порозности сферической насадки в контактной камере  $\bar{\varepsilon}_{\text{сн}}$  (величина изменялась в интервале от 1,0526 до 2,0526), и значения критерия Рейнольдса: 1 —  $\bar{\text{Re}}_{\text{к}} = 0,69565$ ; 2 —  $\bar{\text{Re}}_{\text{к}} = 3,13043$ ; 3 —  $\bar{\text{Re}}_{\text{к}} = 5,56522$

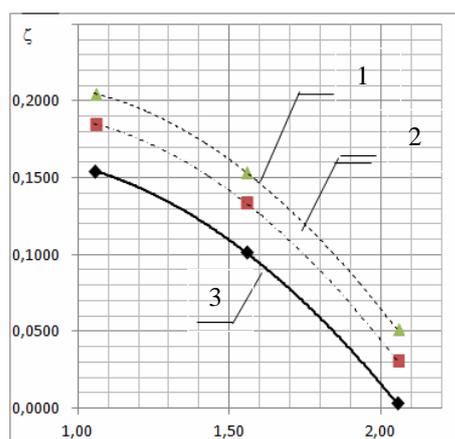


Рис. 2. Изменение степени проскока пыли  $\zeta$  при уровне жидкости в конфузоре, равном 0, в зависимости от относительной порозности сферической насадки в контактной камере  $\bar{\varepsilon}_{\text{сн}}$  (величина изменялась в интервале от 1,0526 до 2,0526), и значения критерия Рейнольдса: 1 —  $\bar{\text{Re}}_{\text{к}} = 0,69565$ ; 2 —  $\bar{\text{Re}}_{\text{к}} = 3,13043$ ; 3 —  $\bar{\text{Re}}_{\text{к}} = 5,56522$

При проведении промышленных испытаний на пыли кварцевого песка со среднемедианным диаметром  $\delta_{50} = 3 \dots 6$  мкм, для которой  $u_p = 0,3 \dots 0,4$  м/с и  $D(u_p) \approx 50\%$ , статистическая обработка результатов эксперимента позволила получить следующую зависимость изменения степени проскока пыли в

устройстве от относительной порозности сферической насадки в контактной камере  $\bar{\varepsilon}_{\text{сн}}$  и относительного значения критерия Рейнольдса в поперечном сечении контактной камеры регрессионного вида:

$$\zeta = 0,0035(\bar{h}_{\text{жк}} - 10,575)^2 - 0,0925(\bar{\varepsilon}_{\text{сн}} - 0,702)^2 - 0,0009(\bar{Re}_k - 9)^2 - 0,160.$$

В качестве функций отклика были приняты степени проскока пыли в пылеуловителе и приведенный коэффициент местного сопротивления аппарата  $\xi$ , характеризующий аэродинамическое сопротивление устройства в рабочем режиме.

Зависимость приведенного коэффициента местного сопротивления  $\xi$  устройства при максимальном уровне заполнения конфузоров водой  $\bar{h}_{\text{жк}} = 0$  от среднерасходовой скорости очищенного газового потока, отнесенной к 1 м/с —  $\bar{v}_{\text{ср}}$ , соответствовавшей значению среднерасходовой скорости, при которой визуально фиксировался режим устойчиво-равномерного аэробарботирования, в первом приближении имеет вид

$$\xi = 153,05(\bar{v}_{\text{ср}})^2 - 931,21\bar{v}_{\text{ср}} + 1323,7.$$

Экспериментально установлено, что минимальное значение степени проскока при улавливании пыли в устройстве наблюдалось в области значения критерия Рейнольдса  $\bar{Re}_k = 0,695652174$ , максимальном уровне (высоте) жидкости в конфузоре,  $\bar{h}_{\text{жк}} = 0$  и относительной порозности сферической насадки в контактной камере  $\bar{\varepsilon}_{\text{сн}} = 2,0526$  и составляло около 0,4 % ( $\zeta = 0,004$ ). При значении критерия Рейнольдса  $\bar{Re}_k = 5,56522$  ( $\bar{v}_{\text{ср}} = 4,27$ ) и наибольшей производительности устройства, уровне (высоте) жидкости в конфузоре,  $\bar{h}_{\text{жк}} = 0$  и относительной порозности сферической насадки в контактной камере  $\bar{\varepsilon}_{\text{сн}} = 2,0526$  степень проскока составляла  $\zeta = 5,2$  %, потери давления в аппарате  $\Delta P_a$  при этом достигали значения около 3200 Па.

#### **Выводы:**

1. Совершенствование систем очистки выбросов промышленности и стройиндустрии может быть реализовано на основе применения предложенных конструкции пылеуловителя, сочетающей высокоэффективный инерционно-гравитационный механизм сепарации основной массы пыли и последующую сепарацию ее редуцированных концентраций барботирующим слоем воды. Основным результатом исследования стало определение принципиальной возможности пылеулавливания в устройстве и области аэродинамических режимных параметров работы. На экспериментальной установке получены данные по величине проскока пыли песка.

2. Анализ графиков, изображенных на рис. 1, 2, показал, что приемлемые значения проскока пыли с практической точки зрения наблюдались при улавливании пыли в устройстве при относительной порозности сферической насадки в контактной камере  $\bar{\varepsilon}_{\text{сн}} = 2,0526$ , значении критерия Рейнольдса  $\bar{Re}_k = 3,13043$  ( $\bar{v}_{\text{ср}} = 3,41$ ) и составляли около 0,05 ( $\zeta = 0,0506$ ). При значении

критерия Рейнольдса  $\overline{Re}_k = 5,56522$  ( $\overline{v}_{cp} = 4,27$ ), уровне (высоте) жидкости в конфузоре,  $\overline{h}_{жк} = 0$  и относительной порозности сферической насадки в контактной камере  $\overline{\varepsilon}_{сн} = 2,0526$  степень проскока составляла  $\zeta = 5,2$  %. Исследованная область рабочих режимов может считаться наиболее приемлемой для достижения наибольшей производительности устройства. При этом потери давления в аппарате  $\Delta P_a$  имеют также приемлемые величины и достигают значения около 1800...2300 Па.

3. Увеличение производительности возможно при помощи масштабирования устройства с добавлением числа ячеек. Удельная величина по очищаемому пылегазовому потоку на одну контактную камеру может быть рекомендована в количестве до 230 м<sup>3</sup>/ч. Рекомендуемая величина концентрации пыли в очищаемом пылегазовом потоке систем аспирации перед устройством составляет до 1 г/м<sup>3</sup>.

**Заключение.** Использование исследованных конструкций пылеуловителей мокрой очистки позволяет получить существенное снижение степени проскока пыли песка и других стройматериалов в системах обеспыливания аспирационных систем стройиндустрии. При этом достигается существенное уменьшение (до 30 %) максимально-разовых и валовых выбросов обеспыливающих систем аспирации на предприятиях стройиндустрии. Для повышения экологической безопасности стройиндустрии изученные конструкции пылеуловителей мокрой очистки могут быть рекомендованы к применению в промышленных условиях в системах обеспыливания аспирационных систем как в одноступенчатых, так и двухступенчатых системах очистки выбросов аспирации в качестве второй ступени очистки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дуда В. Цемент. М.: Стройиздат, 1981. 463 с.
2. Лоскутов Ю. А., Максимов В. И., Веселовский В. В. Механическое оборудование для производства вяжущих строительных материалов. М.: Стройиздат, 1986. 278 с.
3. Комар А. Г. Строительные материалы и изделия. М.: Высшая школа, 1988. 527 с.
4. Борцевский А. А. Механическое оборудование для производства строительных материалов и изделий. М.: Высшая школа, 326 с.
5. Балтеренас П. С. Обеспыливание воздуха на предприятиях строительных материалов. М.: Стройиздат, 1990. 180 с.
6. Особенности аспирации технологического оборудования предприятий по производству цемента / Н. В. Мензелинцева, В. Н. Азаров, Н. Ю. Карапузова, Е. О. Фомина, Е. В. Гладков // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2013. Вып. 31 (50). Ч. 2. С. 499—502.
7. Сергина Н. М., Азаров Д. В., Гладков Е. В. Системы инерционного пылеулавливания в промышленности строительных материалов // Строительные материалы. 2013. № 2. С. 86—88.
8. Кошкарев С. А., Азаров В. Н. Оценка эффективности аппарата мокрой очистки обеспыливания выбросов печей обжига керамзита // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 2. С. 18—32.
9. Кошкарев С. А., Рыльцев В. В. К описанию пылеулавливания во взвешенно-фильтрующем слое и экспериментальная оценка проскока частиц пыли в системах обеспыливания стройиндустрии // Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 6. С. 53—61. doi: 10.15518/isjiae.2015.06.007
10. Азаров В. Н., Кошкарев С. А., Соломахина Л. Я. К экспериментальной оценке эффективности аппарата мокрой очистки в системах обеспыливания выбросов в атмосферу от печей обжига керамзита // Инженерный вестник Дона. 2014. № 4-1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2572](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2572).

11. Improved method to disperse nanoparticles for in vitro and in vivo investigation of toxicity / T. M. Sager, D. W. Porter, V. A. Robinson, W. G. Lindsley, D. E. Schwegler-Berry, V. Castranova // *Nanotoxicology*. 2007. Vol. 1. № 2. Pp. 118—129.
12. *Ordóñez A., Loredó J., De Miguel E.* Charlesworth Distribution of heavy metals in the street dusts and soils of an industrial city in Northern Spain // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2003. Vol. 44. № 2. Pp. 0160—0170.
13. Effectiveness of dust dispersion in the 20-L Siwek chamber / Omotayo Kalejaiye, Paul R. Amyotte, Michael J. Pegg, Kenneth L. Cashdollar // *Journal of loss prevention in the process industries*. 2010. Vol. 23. No. 1. Pp. 46—59. doi: 10.1016/j.jlp.2009.05.008.
14. *Allen T.* Particle size measurement. Springer, 2013. URL: [books.google.ru/books?hl=ru&lr=&id=7dsFCAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR17&dq=analysis+of+variance+dispersed+dust+particle&ots=SkkjTLsXk&sig=5NC9ebZSmyRUxn4VIHzn79pQE08&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.ru/books?hl=ru&lr=&id=7dsFCAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR17&dq=analysis+of+variance+dispersed+dust+particle&ots=SkkjTLsXk&sig=5NC9ebZSmyRUxn4VIHzn79pQE08&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
15. *Ватин Н. И., Гиргидов А. А., Стрелец К. И.* Численное моделирование трехмерного поля скорости в циклоне // *Инженерно-строительный журнал*. 2011. № 5(23). С. 5—9.
16. *Ватин Н. И., Стрелец К. И., Китаин М. Б.* Определение характеристик сварочных искр для расчета их удаления в циклоне // *Инженерно-строительный журнал*. 2011. № 5(23). С. 25—30.
17. *Vatin N. I., Strelets K. I., Kharkov N.* Gas Dynamics in a Counter flow Cyclone with Conical Nozzles on the Exhaust Pipe // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 635—637. Pp. 17—21. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.635-637.
18. *Strelets K. I., Kitain M. B., Petrochenko M. V.* Welding Spark Parameters Determination for Cyclone Removal Calculation // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 941. Pp. 2098—2103.
19. *Strelets K. I., Petrochenko M., Girgidov A.* Energy Performance of Particle Settling in Cyclones // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 725. Pp. 1363—1371.
20. *Азаров В. Н., Кошкарёв С. А., Николенко М. А.* К определению фактических размеров частиц пыли выбросов стройиндустрии и строительства // *Инженерный вестник Дона*. 2015. № 1-2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2858](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2858).
21. *Азаров В. Н., Сергина Н. М.* Методика микроскопического анализа дисперсного состава пыли с применением персонального компьютера (ПК) / В. Н. Азаров, Н. М. Сергина. Волгоград: Волгогр. гос. арх.-строит. акад., 2002. Деп. в ВИНТИ 15.07.2002 №1332-80002. 7 с.
22. *Азаров В. Н., Кошкарёв С. А., Николенко М. А.* Снижение выбросов систем обеспыливания с использованием дисперсионного анализа пыли в стройиндустрии // *Инженерный вестник Дона*. 2015. № 1-2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1\\_y2015/2838](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1_y2015/2838).
23. Experimental study of secondary swirling flow influence on flows structure at separation chamber inlet of dust collector with counter swirling flows / V. N. Azarov, D. V. Lukanin, D. P. Borovkov, A. M. Redhwan // *International review of mechanical engineering*, 2014. Vol. 8. № 5. Pp. 851—856.
24. *Byeong-Kyu Lee, Kwang-Ryun Jung, Sung-Hoon Park.* Development and application of a novel swirl cyclone scrubber – (1) Experimental // *Journal of Aerosol Science*. 2008. Vol. 39. № 12. Pp. 1079—1088. doi: 10.1016/j.jaerosci.2008.07.010.
25. *Sung-Hoon Park, Byeong-Kyu Lee.* Development and application of a novel swirl cyclone scrubber: (2) Theoretical // *Journal of hazardous materials*. 2009. Vol. 164. No 1. Pp. 315—321. doi: [10.1016/j.jhazmat.2008.08.023](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.08.023)
26. *Qingli Wang, Xueli Chen and Xin Gong.* Theoretical and experimental investigation on the characteristics of fly-ash scrubbing in a fixed valve tray column // *AIChE Journal*. 2013. Vol. 59. № 6. Pp. 2168—2178. DOI: 10.1002/aic.13967.
27. Removal of particles from highly viscous liquids with hydrocyclones / S.-A. Marthinussen, Chan Yu-Feng, B. Balakin, A. C. Hoffmann // *Chemical Engineering Science*. 2014. Vol. 108. Pp. 169—175. doi: 10.1016/j.ces.2014.01.008.
28. *Кошкарёв С. А., Саломехина Л. Я., Редван А.* Дисперсионный анализ пыли выбросов в системах аспирации производства цемента с использованием усовершенствованной экспериментальной установки // *Инженерный вестник Дона*. 2015. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3224](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3224).
29. О дисперсном составе пыли в системах аспирации и пневмоуборки / В. Н. Азаров, А. Н. Богомолов, Н. М. Сергина, Н. А. Маринин, Н. И. Чижов // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2011. Вып. 25(44). С. 218—223.

30. Патент № 139122 Россия, МКИ В 01 Д 47/02. Устройство для очистки газов / С. А. Кошкарев, В. Н. Азаров, Т. А. Кисленко. Заявка № 2013138200/05; Заявлено 15.08.2013. Оpubл. бюллетень №10 10.04.2014.

31. Патент № 135806, Россия, U1 МПК G01N 15/00. Устройство для определения дисперсного состава пыли / С. А. Кошкарев, В. Н. Азаров. Заявка №2013121082/28. Заявлено 07.05.2013. Оpubл. бюллетень № 35 20.12.2013.

32. Патент № 156520, Россия, U1 МПК G01N 15/00. Устройство для определения дисперсного состава пыли / С. А. Кошкарев, В. Н. Азаров. Заявка №2015124975/28. 24.06.2015. Заявлено 24.06.2015. Оpubл. 2015.

33. Кошкарев С. А. Повышение экологической безопасности при снижении выбросов систем обеспыливания в стройиндустрии // Интернет-вестник ВолгГАСУ. 2015. Вып. 4(40). Ст. 5. Режим доступа: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>

34. Патент № 2575887. Россия, МКИ В 01 Д 47/02. Устройство для очистки газов / С. А. Кошкарев, В. Н. Азаров и др. Заявка № 2014142646. Заявлено 22.10.2014. Оpubл. 2015.

© Азаров В. Н., Кошкарев С. А., 2016

Поступила в редакцию  
в феврале 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Азаров В. Н., Кошкарев С. А. Повышение экологической безопасности стройиндустрии совершенствованием систем обеспыливания с использованием комплексного дисперсионного анализа пылевых выбросов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 161—174.

Об авторах:

**Азаров Валерий Николаевич** — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой безопасности жизнедеятельности в техносфере, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [ptb2006@mail.ru](mailto:ptb2006@mail.ru)

**Кошкарев Сергей Аркадьевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности в техносфере, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [cool.koshka12@mail.ru](mailto:cool.koshka12@mail.ru)

**V. N. Azarov, S. A. Koshkarev**

## **INCREASE OF ENVIRONMENTAL SAFETY OF CONSTRUCTION INDUSTRY BY IMPROVEMENT OF DECREASING DUST SYSTEMS USING INTEGRATED ANALYSIS OF VARIANCE DUST EMISSIONS**

The article focuses on the increase of environmental safety of the construction industry by improvement of dust decreasing systems using integrated analysis of variance dust emissions of dust aspiration schemes. The proposed design of wet cleaning devices actually implements two-step purification scheme of dust and gas flows using the inertial and gravitational separation mechanism for dust capturing and its additional purifying of residual amount one by the active aero bubbling barbotage through the water bed. The article describes a promising approach to the improvement of the methods of complex analysis of variance dust, accepted are average medium particle' sedimentation velocity  $u_{p50}$  and the distribution function of particle' sedimentation velocity of dust particles of the researched sample. When developing the new design of the dust separators, the results of a comprehensive integrated analysis of variance, the output data rate of which were particle' sedimentation velocity, were used in this article. The extent of the breakthrough in the dust capturing device of the proposed design, for which the patent of the Russian Federation was received, was determined experimentally. The proposed construction of a pilot industrial plant of wet cleaning of dust and gas streams dust decreasing systems was successfully tested in the construction industry. On the basis of the processed data of industrial experiments the authors obtain regression coefficient for the leakage of fine dust particles throughout the studied dust collecting devices as a function of a number of its

options for the studied aerodynamics modes of operation. The results show that the wet cleaning device with the proposed design can significantly reduce the volume of dust emissions amount when manufacturing construction materials. Recommendations for the use of the obtained results for further improvement of dust collecting apparatus of aspiration schemes in construction industry are given because the decrease in the leakage of dust particles in dust decreasing aspiration systems is observed. Increase of environmental safety of manufacturing of a number of dispersion-bulk construction materials while reducing the amount of dust emissions is one of the most effective ways of performance of nature protective measures.

**Key words:** dust, cement, sand, cleaning apparatus, wet cleaning, construction material, leakage, dispersed analysis, velocity, emission, atmosphere, system, dust decreasing, aspiration.

#### REFERENCES

1. Duda V. *Tsement* [Cement]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1981. 463 p.
2. Loskutov Yu. A., Maksimov V. I., Veselovskii V. V. *Mekhanicheskoe oborudovanie dlya proizvodstva vyazhushchikh stroitel'nykh materialov* [Mechanical equipment for production of binding construction materials]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1986. 278 p.
3. Komar A. G. *Stroitel'nye materialy i izdeliya* [Construction materials and products]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1988. 527 p.
4. Borshchevskii A. A. *Mekhanicheskoe oborudovanie dlya proizvodstva stroitel'nykh materialov i izdelii* [Mechanical equipment for production of construction materials and products]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 326 p.
5. Balterenas P. S. *Obespylivanie vozdukha na predpriyatiyakh stroitel'nykh materialov* [Air dust control at the enterprises of construction materials]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1990. 180.
6. Menzelintseva N. V., Azarov V. N., Karapuzova N. Yu., Fomina E. O., Gladkov E. V. [Peculiarities of aspiration of production equipment at enterprises manufacturing cement]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2013, iss. 31(50), pp. 499—502.
7. Sergina N. M., Azarov D. V., Gladkov E. V. [System of Inertial Dust Catching in Construction Materials Industry]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2013, no. 2, pp. 86—88.
8. Koshkarev S. A., Azarov V. N. [Evaluation of wet dust separator effectiveness in the dedusting of emissions from expanded clay kiln]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal* [Magazine of Civil Engineering], 2015, no. 2, pp. 18—32.
9. Koshkarev S. A., Ryltsev V. V. [To the dust separation' description in filtering—fluidized bed and experimental evaluation leakage dust particles out through decreasing dust emissions schemes in the building industry]. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [International Scientific Journal of Alternative Energy and Ecology], no. 6, pp. 53—61. doi: 10.15518/isjaee.2015.06.007
10. Azarov V. N., Koshkarev S. A., Salomakhina L. Ya. [Wet dust separator in the cutting dusting aspiration system of kiln expanded clay gravel oven]. [Engineering journal of Don], 2014, no. 4-1. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/N4y2014/2572](http://ivdon.ru/magazine/archive/N4y2014/2572).
11. Sager T. M., Porter D. W., Robinson V. A., Lindsley W. G., Schwegler-Berry D. E., Castranova V. Improved method to disperse nanoparticles for in vitro and in vivo investigation of toxicity. *Nanotoxicology*, 2007, 1(2), pp. 118—129.
12. Ordóñez A., Loredo J., De Miguel E. Charleswort Distribution of heavy metals in the street dusts and soils of an industrial city in Northern Spain. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2003, 44(2), pp. 0160—0170.
13. Omotayo Kalejaiye, Paul R. Amyotte, Michael J. Pegg, Kenneth L. Cashdollar. Effectiveness of dust dispersion in the 20-L Siwek chamber. *Journal of loss prevention in the process industries*, 2010, 23(1), pp. 46—59. doi: 10.1016/j.jlp.2009.05.008.
14. Allen T. *Particle size measurement*. Springer, 2013. URL: [books.google.ru/books?hl=ru&lr=&id=7dsFCAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR17&dq=analysis+of+variance+dispersed+dust+particle&ots=SkkjTLsXk&sig=5NC9ebZSmyRUxn4VIHzn79pQE08&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](http://books.google.ru/books?hl=ru&lr=&id=7dsFCAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR17&dq=analysis+of+variance+dispersed+dust+particle&ots=SkkjTLsXk&sig=5NC9ebZSmyRUxn4VIHzn79pQE08&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
15. Vatin N. I., Girgidov A. A., Strelets K. I. [Numerical modelling the three-dimensional velocity field in the cyclone]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal* [Magazine of Civil Engineering], 2011, 5, pp. 5—9.

16. Vatin N. I., Strelets K. I., Kitain M. B. [Determination of welding spark parameters for cyclone efficiency calculation]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal* [Magazine of Civil Engineering], 2011, 5, pp. 25—30.
17. Vatin N. I., Strelets K. I., Kharkov N. Gas Dynamics in a Counter flow Cyclone with Conical Nozzles on the Exhaust Pipe. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 635—637, pp. 17—21. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.635-637.
18. Strelets K. I., Kitain M. B., Petrochenko M. V. Welding Spark Parameters Determination for Cyclone Removal Calculation. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 941, pp 2098—2103.
19. Strelets K. I., Petrochenko M., Girgidov A. Energy Performance of Particle Settling in Cyclones. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 725, pp. 1363—1371.
20. Azarov V. N., Koshkarev S. A., Nikolenko M. A. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Determination of the actual size of the particles of dust emission building industry and construction]. [Engineering journal of Don], 2015, no. 1-2. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1p2y2015/2858](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1p2y2015/2858).
21. Azarov V. N., Sergina N. M. [Procedure of microscopic analysis of disperse composition of dust using a personal computer (PC)]. Volgograd, Volgograd State Academy of Architecture and Civil Engineering Publ., 2002. 7 p.
22. Azarov V. N., Koshkarev S. A., Nikolenko M. A. [Experimental evaluation effectiveness of wet dust separator in the cutting dusting aspiration system of kiln expanded clay oven]. [Engineering journal of Don], 2015, no. 1-2. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2015/2838](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2015/2838).
23. Azarov V. N., Lukanin D. V., Borovkov D. P., Redhwan A. M. Experimental study of secondary swirling flow influence on flows structure at separation chamber inlet of dust collector with counter swirling flows // *International review of mechanical engineering*, 2014, 8(5), pp. 851—856.
24. Byeong-Kyu Lee, Kwang-Ryun Jung, Sung-Hoon Park. Development and application of a novel swirl cyclone scrubber – (1) Experimental. *Journal of Aerosol Science*, 2008, 39(12), pp. 1079—1088. doi: 10.1016/j.jaerosci.2008.07.010.
25. Sung-Hoon Park, Byeong-Kyu Lee. Development and application of a novel swirl cyclone scrubber: (2) Theoretical. *Journal of hazardous materials*, 2009, 164(1), pp. 315—321. doi:10.1016/j.jhazmat.2008.08.023
26. Qingli Wang, Xueli Chen and Xin Gong. Theoretical and experimental investigation on the characteristics of fly-ash scrubbing in a fixed valve tray column. *AIChE Journal*, 2013, 59(6), pp. 2168—2178. DOI: 10.1002/aic.13967.
27. Marthinussen S.-A., Chan Yu-Feng, Balakin B., Hoffmann A. C. Removal of particles from highly viscous liquids with hydrocyclones. *Chemical Engineering Science*, 2014, vol. 108, pp. 169—175. doi: 10.1016/j.ces.2014.01.008.
28. Koshkarev S. A., Salomakhina L. Ya., Redhwan A. [Analysis of variance of dust emissions from aspiration systems cement manufacture with using improved experimental setup]. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2015, no. 3. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2015/3224](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2015/3224).
29. Azarov V. N., Bogomolov A. N., Sergina N. M., Marinin N. A., Chizhov N. I. [About particle size distribution in aspiration systems and pneumocleaning]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2011, iss. 25(44), pp. 218—223.
30. Koshkarev S. A., Azarov V. N., Kislenko T. A. *Ustroistvo dlya ochistki gazov* [Device for gas purification. Patent no. 139122 Russia, MKI V 01 D 47/02].
31. Koshkarev S. A., Azarov V. N. *Ustroistvo dlya opredeleniya dispersnogo sostava pyli* [Device for determination of disperse composition of dust. Patent no. 135806, Russia, U1 MPK G01N 15/00].
32. Koshkarev S. A., Azarov V. N. *Ustroistvo dlya opredeleniya dispersnogo sostava pyli* [Device for determination of disperse composition of dust. Patent no. 156520, Russia, U1 MPK G01N 15/00].
33. Koshkarev S. A. [Improvement of environmental safety while reducing dust emissions by decreasing dusting schemes in construction industry]. *Internet-Vestnik VolgGASU*, 2015, no. 4(40), paper 5. Available at: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>
34. Koshkarev S. A., Azarov V. N. *Ustroistvo dlya ochistki gazov* [Device for gas purification. Patent no. 2575887. Russia, MKI V 01 D 47/02].

*For citation:*

Azarov V. N., Koshkarev S. A. [Increase of environmental safety of construction industry by improvement of decreasing dust systems using integrated analysis of variance dust emissions]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 161—174.

*About authors:*

**Azarov Valerii Nikolaevich** — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Life Safety in Technosphere Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [ptb2006@mail.ru](mailto:ptb2006@mail.ru)

**Koshkarev Sergei Arkad'evich** — Candidate of Engineering Science, Docent of Life Safety in Technosphere Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [cool.koshka12@mail.ru](mailto:cool.koshka12@mail.ru)

УДК 628. 511.133

**А. Н. Богомолов<sup>а, б</sup>, Н. С. Жукова<sup>а</sup>, Д. В. Азаров<sup>а</sup>, Д. С. Хегай<sup>в</sup>**

<sup>а</sup> *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

<sup>б</sup> *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

<sup>в</sup> *ООО ПТБ «Волгоградгражданстрой»*

## **ОЦЕНКА ПЫЛЕВОГО ФАКТОРА В ВОЗДУХЕ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ПО ПРОИЗВОДСТВУ МЕЛА**

Приведена методика приближенного описания интегральной функции распределения характеристик меловой пыли методом двухзвенного сплайна. Представлены результаты исследования дисперсного состава меловой пыли в воздухе рабочей зоны методом рассечения. Установлено, что распределение мелких фракций пыли подчиняется логарифмически-нормальному закону. Получены функции распределения для общей концентрации, фракционной концентрации,  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$ .

**Ключевые слова:** пыль,  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ , воздух рабочей зоны, дисперсный анализ, общая концентрация, фракционная концентрация, вероятно-логарифмическая сетка

В современной строительной промышленности мел является одним из используемых материалов для производства цемента, извести, силикатного кирпича, стекла, керамических изделий, различных шпаклевочных и малярных материалов. Отличительная особенность этого природного материала связана с тем, что он легко добывается и перерабатывается при относительно небольших затратах.

Основным неблагоприятным фактором, воздействующим на работников меловых заводов, является пыль. В рабочих зонах на этих предприятиях уровень запыленности превышает предельно-допустимые концентрации. Это приводит к ухудшению качества воздуха рабочей зоны и, следовательно, ведет к росту числа профессиональных заболеваний [1].

Степень опасности неблагоприятного действия пыли на организм рабочих определяется в основном концентрацией пыли в воздухе и ее дисперсностью. От размера частиц зависит, как долго они витают в воздухе рабочей зоны.

В последние годы ведутся интенсивные исследования влияния частиц  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  на здоровье людей [2—4]. В результате седиментации и преципитации большинство частиц  $PM_{10}$  удаляются из воздуха рабочей зоны в течение нескольких часов после их выброса, частицы  $PM_{2,5}$  могут оставаться в воздухе рабочей зоны на протяжении нескольких дней или даже недель. Таким образом, эти частицы могут оказывать вредное воздействие на работников, находящихся в помещении. Сравнение воздействия на организм человека частиц фракции  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  показало, что мелкие частицы биологически активнее, чем крупные, поэтому существеннее влияют на здоровье человека (провоцируя появление острых и хронических заболеваний).

Анализ дисперсного состава пыли в воздухе рабочей зоны является составной частью оценки пылевой обстановки на предприятии [5, 6]. Для оценки качества воздуха рабочей зоны производства мела было проведено исследование

дование в дробильно-размольном отделении на рабочем месте дробильщика. Для проведения анализа дисперсного состава меловой пыли были отобраны пробы пыли при одном и том же технологическом режиме от источника загрязнения (дробилки), поступающей в воздух рабочей зоны предприятия.

Для приближенного описания интегральной функции распределения был использован метод двухзвенного сплайна [7—9]. Первый участок рассматриваем как линейную функцию, второй как гиперболическую (рис. 1). Вероятностно-логарифмическая форма представлена двумя сетками  $(d, D)$  и  $(x, y)$ . По оси абсцисс отложены значения диаметров частиц  $(\delta_1, \delta_2, \delta_3 \dots, \delta_n)$  и их логарифмы  $(x_1, x_2, x_3 \dots, x_n)$ . По оси ординат представлены квантили интеграла вероятностей  $y$  от значений интегральной функции распределения масс частиц по диаметрам  $D (D_1, D_2, D_3 \dots, D_n)$  и значения интегральной функции [10].

Рассмотрим область значений всех размеров частиц  $\delta$  на двух участках: первый участок  $\delta \leq \delta_{кр1}$ , второй участок  $\delta_{кр1} \leq \delta < \delta_{кр2}$  (рис. 1). Следовательно, функция  $D(\delta)$  будет представлена следующим образом:

$$D(\delta) = \begin{cases} D_1(\delta), \delta \leq \delta_{кр1}, \\ D_2(\delta), \delta_{кр1} \leq \delta < \delta_{кр2}. \end{cases}$$

Функции  $D_1(\delta)$  и  $D_2(\delta)$  выбираются из следующих условий:

1. В точке  $\delta_{кр1}$  функции  $D_1(\delta)$  и  $D_2(\delta)$  равны, т. е.  $D_1(\delta) = D_2(\delta)$ .
2. Равенство производных функций  $D_1(\delta)$  и  $D_2(\delta)$  в точке  $\delta_{кр1}$ :  
 $D'_1(\delta) = D'_2(\delta)$ .
3.  $D_1(\delta)$  — линейная функция на участке  $\delta \leq \delta_{кр1}$ ,  $D_2(\delta)$  — возрастающая функция на участке  $\delta_{кр1} \leq \delta < \delta_{кр2}$ , при этом  $\lg \delta_{кр2}$  является вертикальной асимптотой.

В логарифмически-нормальных координатах кривые приобретают достаточно простой вид, связь между координатами будет следующая:

$$x = \lg \delta,$$
$$D = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^y e^{-x^2/2} dx.$$

Тогда  $D_1(\delta) = Y_1(x)$  на участке  $x \leq x_{кр1}$ ,  $D_2(\delta) = Y_2(x)$  на участке  $x_{кр1} \leq x < x_{кр2}$ .

Интегральную кривую  $Y(x)$ , состоящую, например, из двух участков, можно подбирать методом наименьших квадратов на основании имеющихся исследований и замеров.

Аппроксимируем функцию на участке  $[0, x_{кр1}]$  линейной, что подтверждается многочисленными замерами:

$$y_1 = a_1 + kx.$$

На участке  $[x_{кр1}, x_{кр2}]$  аппроксимируем функцию возрастающей гиперболической функцией, имеющей вертикальную асимптоту  $x_{кр2} = \lg x_{кр2}$ :

$$y_2 = a_2 + \frac{a_3}{x_{кр2} - x}.$$

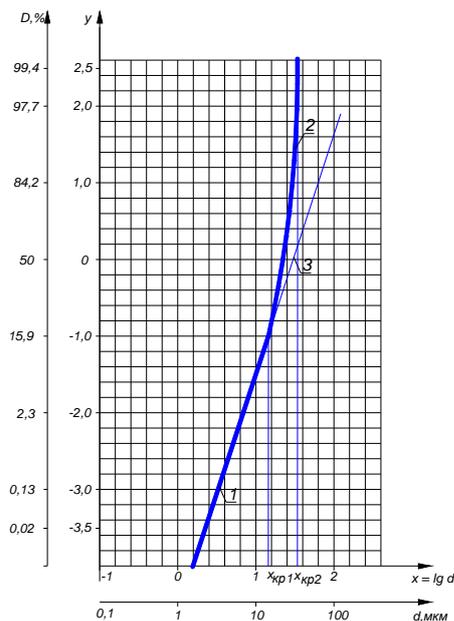


Рис. 1. Аппроксимация интегральной функции распределения дисперсного состава пыли линейной и нелинейной функциями: 1 — линейная функция; 2 — нелинейная функция; 3 — касательная

Для оптимального согласования кривых  $y_1$  и  $y_2$ , задаваемых на участках  $[0, x_{кр1}]$  и  $[x_{кр1}, x_{кр2}]$  предполагаем соблюдение равенств  $Y_1(x_{кр1}) = Y_2(x_{кр2})$ , а именно:

$$\left. \frac{d}{dx} Y_1(x) \right|_{x \rightarrow x_{кр1}-0} = \left. \frac{d}{dx} Y_2(x) \right|_{x \rightarrow x_{кр1}+0} .$$

Проведя ряд преобразований для подбора коэффициентов  $a_1, a_2, a_3, k$ , получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} a_1 + kx_{кр} = a_2 + \frac{a_3}{\Delta}, \\ \frac{a_3}{\Delta^2} = k. \end{cases}$$

В итоге получим выражения для функций  $Y_1(x_{кр1})$  и  $Y_2(x_{кр1})$ :

$$y_1 = a_1 + kx;$$

$$y_2 = a_1 + k(2x_{кр1} - x_{кр2}) + \frac{k(x_{кр2} - x_{кр1})^2}{(x_{кр2} - x)}. \quad (1)$$

Таким образом, для того чтобы функция (1) удовлетворяла не только условиям склейки, но и была наиболее близкой к полученным экспериментальным данным, выбираем для каждого  $x_{кр1}$  значения  $k$  и  $y_{кр1}$  таким образом, что-

бы сумма квадратов отклонений от экспериментальных значений была минимальной.

В итоге получим:

$$Y_i = \begin{cases} y_0 + k\bar{x}_i + \varepsilon_i, & \text{если } \bar{x}_i \leq 0 \\ y_0 + k \left[ -1 + \frac{\Delta^2}{\Delta - \bar{x}_i} \right] + \varepsilon_i, & \text{если } 0 \leq \bar{x}_i < \Delta \end{cases} \quad (2)$$

Искомая функция должна быть выбрана из условия минимума квадратичной формы  $\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 = \varepsilon^T \varepsilon$  при изменении параметров  $x, y_0, k$ . Этот минимум будем искать следующим образом:

1. Для каждого  $x$  необходимо найти величину  $\min_{y_0, k} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2$  и соответствующие этому значению  $x$  значения  $y_0, k$ .

2. Находим минимум формы по  $x$ , и для каждого значения  $x$ , где этот минимум достигается, найдем значения  $y_0, k$  и, следовательно, получим искомую сплайн функцию.

Первый этап можно свести к задаче оптимального планирования путем введения специальной матрицы  $F$ , предложенной В. Н. Азаровым [7, 11, 12]. Введем следующие обозначения:  $Y = (y_1 \dots, y_N)^T$  — вектор значений интегральной функции ( $T$  — символ транспонирования);  $\theta = (y_0, k)^T$  — вектор неизвестных параметров;  $\varepsilon = (\varepsilon_1 \dots, \varepsilon_N)^T$  — вектор отклонений;  $F(x)$  — матрица размером  $(N \times 2)$ , зависящая от  $x$  ( $x_i \leq x$  при  $i \leq n, x_i > x$  при  $n < i \leq N$ ).

$$F(x) = \begin{pmatrix} 1 & \bar{x}_1 \\ 1 & \bar{x}_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \bar{x}_{p-1} \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \left( -1 + \frac{\Delta^2}{\Delta - \bar{x}_p} \right) \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \left( -1 + \frac{\Delta^2}{\Delta - \bar{x}_N} \right) \end{pmatrix}.$$

Задача нахождения вектора  $\theta$  ( $y_0, k$ ) для каждого фиксированного  $x$  сводится к задаче оптимального планирования [7, 11, 12], которая в матричной форме имеет вид

$$Y = F(x_0)\theta + \varepsilon.$$

Согласно теореме Гаусса — Маркова, при условии  $\det F^T F \neq 0$  оценки  $\theta$  метода наименьших квадратов определены однозначно, являются наилучшими линейными несмещенными оценками и имеют вид

$$\theta(x_0) = (F^T F)^{-1} F^T Y. \quad (3)$$

Поэтому для каждого  $x$  наименьшее по параметрам  $y_{кр1}$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  значение  $\varepsilon^T \varepsilon$  определяется следующим образом:

$$\min_{y_0, k_1, k_2} \varepsilon^T \varepsilon(x_0) = (Y - F(F^T F)^{-1} F^T Y)^T (Y - F(F^T F)^{-1} F^T Y). \quad (4)$$

На втором этапе определяют величины  $\varepsilon^T \varepsilon$  по  $x$ . Затем приравнивание производной нулю позволяет определить  $x$ , при котором достигается минимум формы  $\varepsilon^T \varepsilon(x)$  и, следовательно, при котором сплайн-функция (2) является лучшим приближением экспериментальных значений.

Однако наиболее простой способ расчета  $\min \varepsilon^T \varepsilon$  на втором этапе — простой пересчет функции в левой части равенства (4) для всех значений  $x$  и нахождение значения  $x$ , при котором  $\min_{y_0, k_1, k_2} \varepsilon^T \varepsilon(x_0)$  — минимальна, например,

методом последовательных приближений. Затем по формуле (3) находим остальные неизвестные коэффициенты из формулы (2).

Другой важнейшей характеристикой пылевой обстановки на предприятии следует считать интегральную фракционную концентрацию  $C_\phi(d_q)$  пыли в воздухе рабочей зоны, соответствующую массовой концентрации всех частиц с размерами от  $d_{\min}$  до  $d_q$ , которую можно рассматривать как случайную функцию [13]. На рис. 2 приведены результаты измерения фракционной концентрации меловой пыли в воздухе рабочей зоны около дробилки в дробильно-размольном отделении. Замеры производились в течение одного рабочего дня через каждые 30 мин.

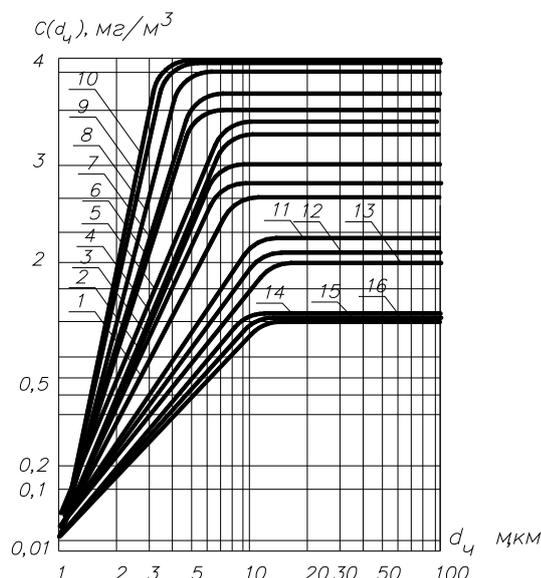


Рис. 2. Результаты измерения фракционной концентрации меловой пыли в воздухе рабочей зоны в дробильно-размольном отделении: 1...16 — пробы от источника загрязнения (дробилки)

Набор статистических данных, полученных в результате измерений, позволил выявить, что случайная функция  $C_{\phi}(d_{\text{ч}})$  имеет плавно меняющиеся реализации и большую предсказуемость.

На рис. 3, а приведена область значений интегральных функций 54 замеров в рабочей зоне источника загрязнения (дробилки). Каждая проба меловой пыли характеризуется кривой, которая находится в области между левой и правой огибающими. Линейные функции графика характеризуются практически одним и тем же углом наклона полученных прямых к положительному направлению оси абсцисс, т. е.  $\alpha \approx 78^\circ$  и, следовательно,  $\text{I}g\sigma = \text{ctg} \alpha \approx 0,21$ . Разброс значений частиц  $\text{PM}_{10}$  (8...42 %) и  $\text{PM}_{2,5}$  (0,01...0,1 %) достаточно высок.

Удобным для анализа дисперсного состава пыли в воздухе рабочей зоны является дифференцированное изображение мелких и крупных фракций. Существует несколько классификаций пыли по дисперсности. Несмотря на множественные различия этих классификаций, многие авторы [14—20] называют пыль мелко- или тонкодисперсной при размере не более 20 мкм. В нашей задаче исследования и контроля  $\text{PM}_{10}$  и  $\text{PM}_{2,5}$  крупными фракциями будем называть частицы пыли диаметром более 20 мкм, а мелкими — менее 20 мкм.

В ряде случаев серии опытов по определению доли частиц пыли диаметром менее 2,5 мкм от общей концентрации ( $\text{PM}_{2,5}/C_{\text{общ}}$ ) на основании критерия Кохрена нельзя считать воспроизводимыми. Вследствие того, на основе рассмотрения функции прохода пыли как случайной предлагается рассматривать отдельно совокупности мелких и крупных фракций, т. е. для анализа дисперсного состава меловой пыли в воздухе рабочей применим метод «рассечение» (рис. 3, б) [21, 22].

Для исследования и контроля  $\text{PM}_{10}$  и  $\text{PM}_{2,5}$  диаметр рассечения генеральной совокупности пыли на мелкие и крупные фракции принимается равным 20 мкм. В данной точке проведем вертикальную линию рассечения графика интегральной функции распределения массы частиц пыли, выделяющейся от дробилки, по диаметру. Проверим содержание пыли менее 10 мкм и соответствие гигиеническим нормативам ГН 2.1.6.2604—10.

Для мелких фракций интегральная функция распределения имеет вид

$$D_{\text{м}}(d_{\text{ч}}) = \begin{cases} \frac{100}{D(d_{\text{р}})} D(d_{\text{ч}}), & \text{если } d_{\text{ч}} \leq d_{\text{р}}, \\ 0, & \text{если } d_{\text{ч}} > d_{\text{р}}, \end{cases}$$

где  $d_{\text{ч}}$  — диаметр частиц, мкм;  $d_{\text{р}}$  — диаметр рассечения, мкм, в нашем случае  $d_{\text{р}} = 20$  мкм.

Для крупных фракций интегральная функция распределения имеет вид

$$D_{\text{кр}}(d_{\text{ч}}) = \begin{cases} 0, & \text{если } d_{\text{ч}} \leq d_{\text{р}}, \\ 100 - 100 \frac{100 - D(d_{\text{ч}})}{100 - D(d_{\text{р}})}, & \text{если } d_{\text{ч}} > d_{\text{р}}. \end{cases} \quad (5)$$

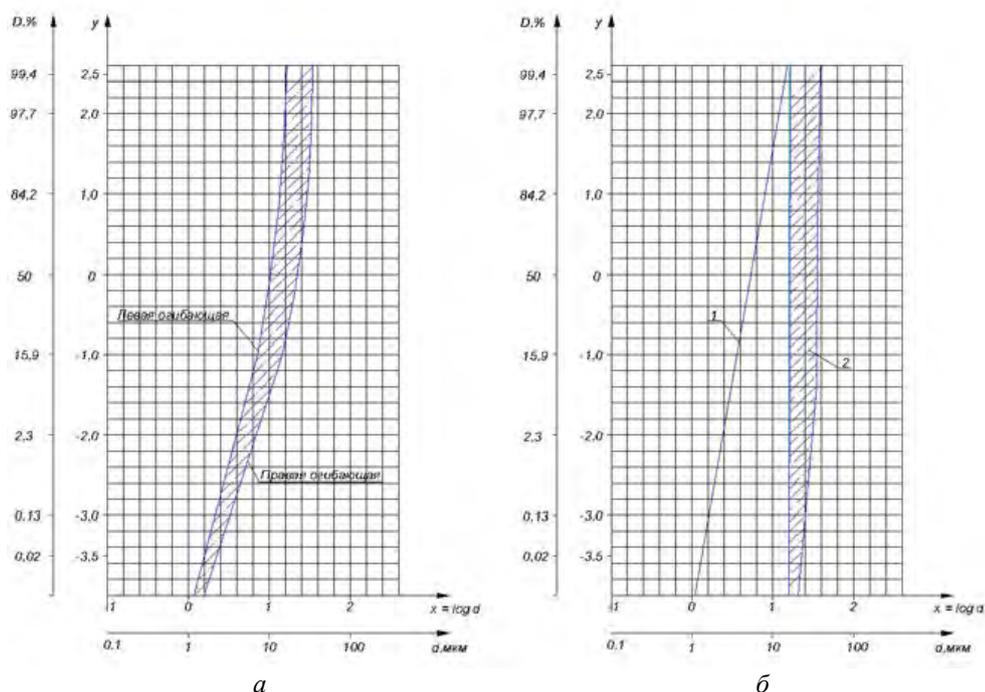


Рис. 3. Значения интегральных функций распределения для крупных и мелких частиц пыли, выделяющейся в воздух рабочей зоны от дробилки: *a* — до метода «рассечение»; *б* — после метода «рассечение»: 1 — мелкие частицы пыли; 2 — область значений крупных частиц пыли

Анализ результатов дисперсного состава меловой пыли, поступающей в разные моменты времени в воздух рабочей зоны в дробильно-размольное отделение на рабочем месте дробильщика, показал, что они удовлетворительно описываются усеченным логарифмически-нормальным распределением.

Некоторая случайная величина  $X$  имеет логарифмически-нормальное распределение, если её натуральный логарифм  $(\ln x)$  подчинён нормальному закону распределения и её плотность такова:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}},$$

где  $x$  — случайная величина,  $x > 0$ ;  $\mu$  — параметр положения,  $-\infty < \mu < \infty$ ;  $\sigma$  — параметр масштаба,  $\sigma > 0$ .

Поскольку была выдвинута гипотеза о подчинении распределения значений концентраций меловой пыли логарифмически-нормальному закону распределения, то для проверки гипотезы нами использовались критерии согласия Пирсона и одновыборочный критерий Колмогорова для уровня значимости  $\beta = 5\%$ .

Формула для расчета наблюдаемого значения критерия Пирсона [23] выглядит так:

$$\chi^2 = n \sum_{i=1}^k \frac{(p_i^* - p_i)^2}{p_i},$$

где  $n$  — число наблюдений;  $p_i^*$  — наблюдаемые вероятности;  $p_i$  — теоретические вероятности.

Поиск теоретического значения критерия Пирсона, производился в специальных таблицах  $\chi^2$ -распределения [24]. Для выбора табличного значения критерия Пирсона необходимо определить число степеней свободы  $r$  и уровень значимости:

$$r = k - s,$$

где  $r$  — число степеней свободы;  $k$  — число разрядов;  $s$  — число наложенных связей.

Критерий Колмогорова применяют в качестве меры расхождения между теоретическим и эмпирическим распределениями, рассматривают максимальное значение абсолютной величины разности между эмпирической функцией распределения  $F_n(x)$  и соответствующей теоретической функцией распределения [25]:

$$D = \max_{-\infty \leq x \leq \infty} |F_n(x) - F(x)|,$$

где  $D$  — статистика критерия Колмогорова;  $F_n(x)$  — эмпирическая функция распределения;  $F(x)$  — теоретическая функция распределения.

Наблюдаемое значение критерия Колмогорова определяется по соотношению

$$\lambda = D\sqrt{n},$$

где  $n$  — число наблюдений.

Теоретическое значение критерия Колмогорова получено из специальных таблиц критических значений  $\lambda_\alpha$ . Для этого необходимо задать уровень значимости  $\alpha$ :

$$p(\lambda) = \alpha.$$

Расчет наблюдаемых значений критериев согласия Пирсона и Колмогорова для левой и правой огибающих производился в программе STATISTICA. Результаты расчета представлены в табл.

*Значения критериев согласия*

Огибающая	$n$	Уровень значимости, %	Теоретическое значение критерия		Наблюдаемое значение критерия	
			Критерий Пирсона $\chi$	Критерий Колмогорова $\lambda$	Критерий Пирсона $\chi$	Критерий Колмогорова $\lambda$
Левая	20	5	31,410	0,294	17,191	0,156
Правая	16	5	26,296	0,327	20,898	0,200

Если  $\chi_{\text{набл}}^2 < \chi_{\text{теор}}^2$ , то гипотеза подчинении экспериментальных данных теоретическому закону распределения принимается, в противном случае теория отвергается.

Если  $\lambda_{\text{набл}}^2 < \lambda_{\text{теор}}^2$ , то гипотеза подчинении экспериментальных данных теоретическому закону распределения принимается, в противном случае теория отвергается.

Для левой стороны выполняется условие критерия Пирсона и Колмогорова, так как  $\chi_{\text{набл}}^2 = 17,191 < \chi_{\text{теор}}^2 = 31,410$  и  $\lambda_{\text{набл}}^2 = 0,156 < \lambda_{\text{теор}}^2 = 0,294$ .

Для правой стороны, выполняется условие критерия Пирсона и Колмогорова, так как  $\chi_{\text{набл}}^2 = 20,898 < \chi_{\text{теор}}^2 = 26,296$  и  $\lambda_{\text{набл}}^2 = 0,327 < \lambda_{\text{теор}}^2 = 0,200$ .

По результатам экспериментальных исследований для левой и правой огибающих были построены дифференциальные функции распределения концентраций (рис. 4).

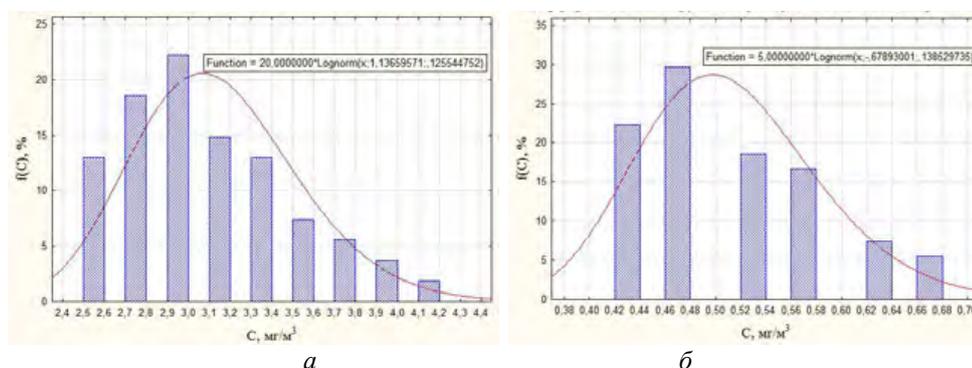


Рис. 4. Дифференциальные функции распределения концентрации: *a* — левая огибающая; *б* — правая огибающая

Левая огибающая имеет следующее уравнение функции:

$$y(x) = 20 \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}},$$

где  $x$  — значение концентрации пыли,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;  $\mu$  — параметр положения функции плотности логарифмически-нормального закона распределения,  $\mu = 1,137$ ;  $\sigma$  — параметр масштаба функции плотности логарифмически-нормального закона распределения,  $\sigma = 0,126$ .

Правая огибающая имеет уравнение функции:

$$y(x) = 5 \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}},$$

где  $x$  — значение концентрации пыли,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;  $\mu$  — параметр положения функции плотности логарифмически-нормального закона распределения,  $\mu = -0,679$ ;  $\sigma$  — параметр масштаба функции плотности логарифмически-нормального закона распределения,  $\sigma = 0,139$ .

Функции  $D$ ,  $D_m$  и  $D_{кр}$  связаны следующим образом:

$$D = m_m D_m + m_{кр} D_{кр},$$

где  $D_m$  — интегральная функция (детерминированная) для мелких частиц ( $\delta \leq 10$  мкм);  $D_{кр}$  — случайная функция для крупных частиц ( $\delta > 10$  мкм);  $m_m$ ,  $m_{кр}$  — доли, соответственно, мелких и крупных частиц (случайная величина), при этом  $m_m + m_{кр} = 1$ .

Допустим, что  $m_m = \alpha$ , где  $\alpha$  — случайная величина, тогда получим:

$$D = \alpha D_m + (1 - \alpha) D_{кр}.$$

Тогда расчет  $PM_{10}$  будет проводиться по формуле

$$PM_{10} = C_{\Sigma} D(10 \text{ мкм}) = C_{\Sigma} [\alpha D_m(10) + (1 - \alpha) D_{кр}(10)]. \quad (6)$$

В случае когда  $\delta \leq \delta_{сеч}$ , то на основании формулы (5)  $D_{кр} = 0$  и формула (6) примет вид

$$PM_{10} = C_{\Sigma} \alpha D_m(10).$$

В результате проведенных исследований установлено, что левая и правая отгибающиеся (см. рис. 3, а) подчиняются логарифмически-нормальному закону. Также получены функции распределения для общей концентрации, фракционной концентрации,  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$ .

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пономарева Н. С. О концентрации меловой пыли в воздухе рабочих зон и выбросах в атмосферу на предприятиях строительной индустрии // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2010. Вып. 20(39). С. 93—98.
2. Азаров В. Н., Тertiшников И. В., Маринин Н. А. Нормирование  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  как социальных стандартов качества в районах расположения предприятий стройиндустрии // Жилищное строительство. 2012. Вып. 3. С. 20—23.
3. Калюжина Е. А., Несветаев Г. В., Азаров В. Н. Исследования значений  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  в выбросах в атмосферу и рабочую зону при ремонтно-строительных работах // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2012. Вып. 1(20). Ст. 24. URL: <http://vestnik.vgasu.ru/?source=4&coverno=75>
4. О загрязнении мелкодисперсной пылью воздушной среды городских территорий // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии / В. Н. Азаров, Н. С. Барикаева, Т. Н. Лопатина, Н. А. Маринин. 2013. № 1. С. 30—33.
5. О дисперсном составе пыли в воздушной среде в производстве строительных материалов / В. Н. Азаров, Н. А. Маринин, Р. А. Бурханова, А. В. Азаров // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. Вып. 30(49). С. 256—260.
6. Азаров В. Н., Кошкарёв С. А., Николенко М. А. Снижение выбросов систем обеспыливания с использованием дисперсионного анализа пыли в стройиндустрии // Инженерный вестник Дона. 2015. № 1. Ч. 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2838](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2838)
7. Азаров В. Н. Комплексная оценка пылевой обстановки и разработка мер по снижению запыленности воздушной среды промышленных предприятий : дис... д-ра техн. наук. Ростов н/Д, 2004.
8. Дисперсный состав пыли как случайная функция / В. Н. Азаров, Д. В. Азаров, А. Б. Гробов и др. // Объединенный научный журнал. 2003. № 6. С. 62—64.
9. О расчетной модели дисперсного состава пыли в воздухе рабочей зоны и инженерно-экологических систем / Н. С. Пономарева, Е. В. Гладков, В. А. Шибиков, И. А. Гвоздков // Ка-

чество внутреннего воздуха и окружающей среды = Indoor air and environmental quality: XI Междунар. науч. конф., 23 марта — 5 апр. 2013 г., г. Ханой. Волгоград : ВолгГАСУ, 2013. С. 31—37.

10. *Азаров В. Н., Власова О. С., Клименти Н. Ю.* Анализ запыленности воздуха рабочих зон цехов завода по производству силикатного кирпича // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2013. Вып. 32(51). С. 172—177.

11. Об исследовании дисперсного состава пыли в воздухе жилых районов / В. Н. Азаров, Н. С. Барикаева, Н. А. Маринин, О. А. Мартынова // Фундаментальные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2012 году: сборник научных трудов. Волгоград, 2013. С. 492—495.

12. *Азаров В. Н.* О концентрации и дисперсном составе пыли в воздухе рабочих и обслуживаемых зон предприятий стройиндустрии // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды = Indoor air and environmental quality: материалы II Междунар. науч. конф., 15—19 сент. 2003 г., Волгоград. Волгоград : [ВолгГАСУ], 2003. С. 27—31.

13. *Азаров В. Н.* О фракционном составе пыли в рабочей зоне и инженерно-экологических системах // Междунар. науч.-техн. конф. «Технология, строительство и эксплуатация инженерных систем». СПб, 2002. С. 10—13.

14. *Коузов П. А.* Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. 3-е изд., перераб. Л. : Химия, 1987. 264 с.

15. *Белоцерковский О. М., Давыдов Ю. М.* Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982. 392 с.

16. *Медников Е. П.* Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М. : Наука, 1981. 176 с.

17. *Пирумов А. И.* Обеспыливание воздуха. М.: Стройиздат, 1974. 207 с.

18. *Сорокин В. В.* Вентиляция на предприятиях строительных материалов. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1991. 382 с.

19. *Фукс Н. А.* Механика аэрозолей. М. : АН СССР, 1955.

20. *Фукс Н. А., Стругин А. Г.* Высокодисперсные аэрозоли. М., 1969. 80 с.

21. *Азаров В. Н., Тетерева Е. Ю., Маринин Н. А.* Метод «рассечения» как способ оценки дисперсного состава пыли в инженерно-экологических системах строительных производств // VIII Международная конф. «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды», г. Самарканд. Волгоград : ВолгГАСУ, 2010. С. 120 — 126.

22. *Азаров В. Н., Есина Е. Ю., Азарова Н. В.* Анализ дисперсного состава пыли в технике: учебное пособие. Волгоград: ВолгГАСУ, 2008. 46 с.

23. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей. М. : Наука, 1969. 576 с.

24. *Большев Л. Н., Смирнов Н. В.* Таблицы математической статистики. М.: Наука: Главная редакция физико-математической литературы, 1983. 416 с.

25. *Черкесов Г. Н.* Надежность аппаратно-программных комплексов. СПб. : Питер, 2005. 479 с.

© *Богомолов А. Н., Жукова Н. С., Азаров Д. В., Хегай Д. С., 2016*

*Поступила в редакцию  
в феврале 2016 г.*

*Ссылка для цитирования:*

Оценка пылевого фактора в воздухе рабочей зоны на предприятиях по производству мела / А. Н. Богомолов, Н. С. Жукова, Д. В. Азаров, Д. С. Хегай // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 175—188.

*Об авторах:*

**Богомолов Александр Николаевич** — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой гидротехнических и земляных сооружений, проректор по научной работе, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; проф. кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, [banzaritcyn@mail.ru](mailto:banzaritcyn@mail.ru)

**Жукова Наталия Сергеевна** — канд. техн. наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности в техносфере, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [pns15@yandex.ru](mailto:pns15@yandex.ru)

**Азаров Денис Валерьевич** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности в техносфере, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [kaf\\_bgdvt@mail.ru](mailto:kaf_bgdvt@mail.ru)

**Хегай Дмитрий Сергеевич** — инженер программного обеспечения, ООО «ПТБ «Волгоградгражданстрой»». Российская Федерация, г. Волгоград, ул. Баррикадная, 1, [khegaydima@hotmail.ru](mailto:khegaydima@hotmail.ru)

**A. N. Bogomolov, N. S. Zhukova, D. V. Azarov, D. S. Khegai**

## ASSESSMENT OF DUST FACTOR IN AIR OF THE WORKING ZONE AT THE ENTERPRISES OF CHALK PRODUCTION

The article describes the technique of approximate description of integrated function of distribution of characteristics of chalk dust by the method of two-unit spline. The results of the research of disperse composition of chalk dust in the air of the working zone by dissection method are presented. It is established that the distribution of small dust fractions complies with logarithmic normal law. Functions of distribution for overall concentration, fractional concentration,  $PM_{10}$  and  $PM_{2,5}$  are received.

**Key words:** dust,  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ , air of the working zone, disperse analysis, overall concentration, fractional concentration, probabilistic and logarithmic grid.

### REFERENCES

1. Ponomareva N. S. [About concentration of chalk and plaster dust in the air of working zones and air emissions construction industry]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2010, iss. 20(39), pp. 93—98.
2. Azarov V. N., Tertishnikov I. V., Marinin N. A. [Rating of  $PM_{10}$  and  $PM_{2,5}$  as Social Standards of Life Quality in Areas of Building Industry Enterprises Location]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing Construction], 2012, no. 3, pp. 20—23.
3. Kalyuzhina E. A., Nesvetaev G. V., Azarov V. N. [Research OF  $PM_{10}$  and  $PM_{2,5}$  values in emissions into atmosphere and work area during the repair-and-construction works]. *Internet-Vestnik VolGASU*, 2012, no. 1(20), paper 24. Available at: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>
4. Azarov V. N., Marinin N. A., Barikaeva N. S., Lopatina T. N. [Air pollution by highly dispersed dust in urban areas]. *Biosfernaya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii* [Biosphere compatibility: human, region, technologies], 2013, no. 1, pp. 30—33.
5. Azarov V. N., Marinin N. A., Burkhanova R. A., Azarov A. V. [Disperse structure of dust in the air environment in production of construction materials]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2013, iss. 30(49), pp. 256—260.
6. Azarov V. N., Koshkarev S. A., Nikolenko M. A. [Experimental evaluation effectiveness of wet dust separator in the cutting dusting aspiration system of kiln expanded clay oven]. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2015, 1(2). URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2838](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2838)
7. Azarov V. N. *Kompleksnaya otsenka pylevoi obstanovki i razrabotka mer po snizheniyu zapylennosti vozdushnoi sredy promyshlennykh predpriyatii* [Comprehensive assessment of dust situation and development of measures to decrease dustiness of the air environment at industrial enterprises. Dr. Eng. Sci. Diss.]. Rostov-on-Don, 2004.
8. Azarov V. N., Azarov D. V., Grobov A. B. [Disperse composition of dust as stochastic function]. *Ob"edinennyi nauchnyi zhurnal* [Joint scientific journal], 2003, no. 6, pp. 62—64.

9. Ponomareva N. S., Gladkov E. V., Shibakov V. A., Gvozdokov I. A. [About calculation model of disperse composition of dust in the air of working space and engineering and environmental systems]. *Indoor air and environmental quality: XI Inter. Sc. Conf.*, 23 March — 5 April, 2013, Khanoi. Volgograd, VSUACE Publ., 2013. Pp. 31—37.
10. Azarov V. N., Vlasova O. S., Klimenti N. Yu. [Analysis of dust content of air in working zones of factory workshops producing lime brick]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2013, iss. 32(51), pp. 172—177.
11. Azarov V. N., Barikaeva N. S., Marinin N. A., Martynova O. A. [About research of disperse composition of dust in the air of residential areas]. *Fundamental'nye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noi otrasli Rossiiskoi federatsii v 2012 godu: sbornik nauchnykh trudov* [Fundamental researches by RAACS on scientific support of the development of architecture, town planning and construction industry in the Russian Federation in 2012. Set of research papers]. Volgograd, 2013. Pp. 492—495.
12. Azarov V. N. [About concentration and disperse composition of dust in the air of working and serving areas at enterprises of construction industry]. *Indoor air and environmental quality. Proc. II Int. Sci. Conf.*, 15—19 sept. 2003 g., Volgograd, VSUACE Publ., 2003. Pp. 27—31.
13. Azarov V. N. [About fractional composition of dust in working area and engineering and environmental systems]. *Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Tekhnologiya, stroitel'stvo i ekspluatatsiya inzhenernykh sistem»* [Intern. Sc.-Tech. Conf. “Technology, construction and operation of engineering systems”]. Saint Petersburg, 2002. Pp. 10—13.
14. Kouzov P. A. *Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pylei i izmel'chennykh materialov. 3-e izd., pererab.* [Principals of analysis of disperse composition of industrial dust and powder materials. 3d ed., revised]. Leningrad, Khimiya Publ., 1987. 264 p.
15. Belotserkovskii O. M., Davydov Yu. M. *Metod krupnykh chastits v gazovoi dinamike* [Large particle method in gas dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 392 p.
16. Mednikov E. P. *Turbulentnyi perenos i osazhdenie aerozolei* [Turbulent transfer and aerosol deposition]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 176 p.
17. Pirumov A. I. *Obespylivanie vozdukh* [Air dust control]. Moscow, Stroizdat Publ., 1974. 207 p.
18. Sorokin V. V. *Ventilyatsiya na predpriyatiyakh stroitel'nykh materialov* [Ventilation at enterprises of construction materials]. Saratov, Publishing House of Saratov University, 1991. 382 p.
19. Fuks N. A. *Mekhanika aerozolei* [Aerosol mechanics]. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1955.
20. Fuks N. A., Strugin A. G. *Vysokodispersnye aerozoli* [Fine-grained aerosols]. Moscow, 1969. 80 p.
21. Azarov V. N., Tetereva E. Yu., Marinin N. A. [“Section” method as a method of assessment of disperse composition of dust in engineering and environmental systems of construction productions]. *VIII Mezhdunarodnaya konf. «Kachestvo vnutrennego vozdukh* i okruzhayushchei sredy», Samarkand [VIII Int. Conf. “Indoor air and environmental quality”, Samarkand]. Volgograd, VSUACE Publ., 2010. Pp. 120—126.
22. Azarov V. N., Esina E. Yu., Azarova N. V. *Analiz dispersnogo sostava pyli v tekhnosfere: uchebnoe posobie* [Analysis of disperse composition of dust in a technosphere. Textbook]. Volgograd, VSUACE Publ., 2008. 46 p.
23. Venttsel' E. S. *Teoriya veroyatnostei* [Probability theory]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 576 p.
24. Bol'shev L. N., Smirnov N. V. *Tablitsy matematicheskoi statistiki* [Tables of mathematical statistics]. Moscow, Nauka Publ.: Chief editorial board physical and mathematical literature, 1983. 416 p.
25. Cherkesov G. N. *Nadezhnost' apparatno-programmnykh kompleksov* [Reliability of hardware and software complex]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2005. 479 p.

*For citation:*

Bogomolov A. N., Zhukova N. S., Azarov D. V., Khegai D. S. [Assessment of dust factor in air of the working zone at the enterprises of chalk production]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 175—188.

*About authors:*

**Bogomolov Aleksandr Nikolaevich** — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Vice-Rector for Scientific Research, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation; Professor of Construction Operations and Geotechnics Department, Perm National Research Polytechnic University. 29, Komsomolskii Prospect, Perm', 614990, Russian Federation, [banzaritcyn@mail.ru](mailto:banzaritcyn@mail.ru)

**Zhukova Nataliya Sergeevna** — Candidate of Engineering Science, Docent of Life Safety in Technosphere Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [pn515@yandex.ru](mailto:pn515@yandex.ru)

**Azarov Denis Valer'evich** — Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Life Safety in Technosphere Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [kaf\\_bgdvt@mail.ru](mailto:kaf_bgdvt@mail.ru);

**Khegai Dmitrii Sergeevich** — Engineer of software, LLC "PTB "Volgogradgrazhdanstroi". 1, Barrikadnaya St., Volgograd, Russian Federation, [khegaydima@hotmail.ru](mailto:khegaydima@hotmail.ru)

УДК 502.3:504.5:691:061.5

**Ю. С. Михайловская, Н. В. Мензелинцева, Н. Ю. Карапузова, В. А. Лактюшин,  
С. А. Богомолов**

*Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

## **НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО УЩЕРБА ОТ ВЫБРОСОВ ПРЕДПРИЯТИЙ СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА**

Обосновывается научно-методический подход к определению экологического ущерба от выбросов предприятий строительного комплекса, предполагающий учет свойств пыли, в частности ее дисперсного состава, а также применение наилучших существующих технологий при оценке удельных затрат на газоочистку.

Ключевые слова: ущерб, пыль предприятий строительной отрасли, диаметр частиц.

Оценка и возмещение вреда, причиняемого окружающей среде, природным ресурсам, здоровью населения, а также различным субъектам правовых отношений и хозяйственной деятельности, регламентируются значительным числом нормативно-методических документов, утвержденных как на федеральном, так и на региональном уровнях. Только на федеральном уровне в настоящее время насчитываются десятки нормативных документов, определяющих и уточняющих порядок и методику расчета вреда.

Документы регионального уровня, утвержденные органами власти субъектов Российской Федерации, либо восполняют пробелы в нормативных методах оценки вреда тем или иным компонентам природной среды, либо являются развитием документов, имеющих федеральный статус, с учетом местных особенностей. Большая часть документов федерального и регионального уровней включает вопросы стоимостной оценки размеров вреда, порядка его компенсации, а также полномочий должностных лиц и государственных органов в данной сфере деятельности.

Несмотря на обширный набор нормативно-правовых документов и длительную практику их применения, собственно понятие «экологический вред», причиненный природной среде, практически нигде однозначно не раскрыто. Поэтому в документах, имеющих статус нормативно закрепленных, часто фигурируют как равнозначные по содержанию термины: «вред», «ущерб» и «убытки». При этом понятие «ущерб» обычно практикуется шире, чем материальный или реальный ущерб и приближается по своему значению к понятию «вред». В Федеральном законе «Об охране окружающей среды» (2002 г.) под вредом окружающей среде понимают негативное изменение окружающей среды в результате ее загрязнения, повлекшее за собой деградацию естественных экологических систем и истощение природных ресурсов. Однако нет четкого определения деградации экосистем и истощения природных ресурсов.

В большинстве действующих методик заложен нормативный подход исчисления экологического вреда, применение которого ведет к некорректным и необоснованным результатам [1].

Существуют и другие подходы к определению вреда, нанесенного окружающей среде, в нашей стране и в мировой практике [2—5].

Развитие природоохранного законодательства Российской Федерации, международное сотрудничество с другими странами требует совершенствования методов оценки вреда, возникающего в результате негативного воздействия на окружающую природную среду.

Разработан метод расчета ущерба, нанесенного выбросами загрязняющих веществ конкретного промышленного предприятия объектам окружающей среды, экологическим системам, строительным конструкциям, памятникам и сельскохозяйственным культурам. Этот метод утвержден как ГОСТ Р 56167—2014 «Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Метод расчета ущерба от промышленного предприятия объектам окружающей среды».

Однако воздействие пыли, содержащейся в выбросах предприятий, определяется не только количественными показателями, но и свойствами пыли, среди которых наиболее значим дисперсный состав. Известно, что пыль предприятий строительного комплекса содержит значительное количество мелкодисперсных частиц, что усиливает степень опасности их воздействия на живые организмы и должно учитываться при оценке нанесенного вреда. Такая пыль распространяется на значительные расстояния, увеличивая тем самым зону загрязнения, что также следует учитывать при оценке величины вреда [6].

Расчет ущерба  $B$  в руб., нанесенного выбросами загрязняющих веществ конкретного предприятия строительной индустрии объектам окружающей среды, экологическим системам, строительным конструкциям, памятникам и сельскохозяйственным культурам, производят по формуле

$$B = \sum Y_{zi} f K_{ин} M_i + Z_0,$$

где  $B$  — размер величины ущерба, причиненного сверхнормативными выбросами вредных (загрязняющих) веществ, руб.;  $Y_{zi}$  — показатель удельного ущерба от выброса 1 условной т загрязняющих веществ в атмосферный воздух, руб./т;  $K_{ин}$  — коэффициент индексации, который определяется исходя из уровня инфляции, на 2013 г. равный 2,20;  $M_i$  — масса  $i$ -го загрязняющего вещества; определяется в соответствии с вышеуказанными формулами по каждому ингредиенту загрязнения, т;  $i$  — порядковый номер загрязняющего вещества, безразмерная величина;  $Z_0$  — затраты на установление факта причинения вреда и оценку размера негативного воздействия, руб;  $f$  — коэффициент, учитывающий характер рассеивания примесей в атмосферном воздухе, скорость оседания и величину частиц.

а) для газов и мелкодисперсных частиц, оседающих со скоростью менее 1 см/с:

$$f = \left( \frac{100}{100 + \varphi H} \right) \left( \frac{4}{I + U} \right),$$

где  $U$  — среднегодовое значение скорости ветра;  $\varphi$  — поправка на подъем факела выбросов в атмосферу;

б) для частиц, оседающих со скоростью 1...20 см/с:

$$f = \sqrt{\frac{1000}{60 + \varphi H}} \left( \frac{4}{I + U} \right);$$

в) для частиц, оседающих со скоростью выше 20 см/с величина  $f = 10$ .

Если значения  $f$  для различных примесей оказываются различными, то общая оценка ущерба, наносимого окружающей среде выбросами вредных веществ в атмосферу, равна сумме оценок, относящихся к каждому типу примесей, согласно их вкладам.

Учет параметра  $\varphi$  является необходимым для низких неорганизованных источников (складов, вентиляторов, окон промышленных зданий, карьеров и т. п.). На предприятиях по производству строительных материалов, использующих цемент, такие источники могут оказаться единственными, способными нанести серьезный ущерб окружающей среде.

Для расчета величины  $\varphi$  используют выражение

$$\varphi = 1 + \Delta T / 75,$$

где  $\Delta T$  — среднегодовое значение разности температур атмосферы и выбрасываемых газов в устье трубы, °С.

Расчет удельных затрат на улавливание и (или) обезвреживание  $i$ -го вещества  $Y_{zi}$ , руб./т, рассчитывают по формуле

$$Y_{zi} = \frac{C_i}{m_i},$$

где  $C_i$  — затраты на приобретение и установку оборудования по улавливанию и (или) обезвреживанию  $i$ -го загрязняющего вещества, определяемые по рыночным ценам на аналогичное очистное оборудование, которое используется или должно использоваться на источнике, и работы по установке оборудования, руб.;  $m_i$  — масса  $i$ -го загрязняющего вещества, улавливаемого очистным оборудованием за год, т.

Для определения скорости оседания твердых частиц рассмотрим движение частицы в потоке атмосферного воздуха.

В теории атмосферной диффузии рассеивание в основном определяется турбулентным обменом и скоростью ветра. Будем учитывать силу тяжести, силу сопротивления о воздух, ветровой снос в горизонтальном направлении и наличие периодических горизонтальных и вертикальных колебаний.

В уравнении движения пыли в векторном виде имеет вид

$$m \frac{d\vec{U}}{dt} = m\vec{g} + 6\pi\rho_a \nu R (\vec{W}(\vec{r}, t) - \vec{U}(\vec{r}, t)), \quad (1)$$

где  $m$  — масса частицы;  $\vec{U}(\vec{r}, t)$  — вектор скорости пылинки,  $\rho_a$  — плотность воздуха,  $\nu$  — его кинематическая вязкость;  $R$  — эффективный радиус пылинки;  $\vec{W}(\vec{r}, t)$  — вектор скорости атмосферы.

В [6] получено решение данного уравнения численными методами для гипотетической пыли, при этом минимальный диаметр частиц составил

10 мкм. Проведем аналогичные рассуждения при исследовании закономерностей распространения пыли выбросов предприятий строительной и индустрии с диаметром менее 10 мкм.

Предположим, что атмосфера испытывает периодические пульсации с характерной частотой, различной для вертикального и горизонтального движения. Выделим у компонентов скорости  $\vec{W}(\vec{r}, t)$  среднюю величину, которая может зависеть только от  $z$ -координаты, и пульсационные составляющие, которые явно зависят от  $z$  и  $t$ :

$$W_x = W_0(z) + \delta W_x(z, t); \quad (7)$$

$$W_z = \delta W_z(z, t). \quad (8)$$

При условии, что амплитуда пульсации пропорциональна скорости потока на данной высоте, уравнение (1) по компонентам можно представить в следующем виде:

$$\frac{du}{dt} = A[W_0(1 + \Delta_x \cos(\bar{\omega}_x t + \varphi_x) - u)]; \quad (2)$$

$$\frac{dw}{dt} = -g + A[W_0 \Delta_z \cos(\bar{\omega}_z t + \varphi_z) - w]; \quad (3)$$

$$\text{где } A = \frac{18\rho_g v}{4\rho_d R^2},$$

где  $\Delta_{x,z}$  — параметры, определяющие относительные амплитуды пульсации;  $\bar{\omega}_{x,z}$ ,  $\varphi_{x,z}$  — частоты и фазы соответственно.

Численное интегрирование системы дифференциальных уравнений (2, 3) проведем, используя метод Рунге — Кутты 4-го порядка. В момент времени  $t + \Delta t$  положение пылинки описывается уравнениями:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + (k_1 + 2(k_2 + k_3) + k_4) / 6;$$

$$z(t + \Delta t) = z(t) + (p_1 + 2(p_2 + p_3) + p_4) / 6;$$

$$u(t + \Delta t) = u(t) + (l_1 + 2(l_2 + l_3) + l_4) / 6;$$

$$w(t + \Delta t) = w(t) + (s_1 + 2(s_2 + s_3) + s_4) / 6.$$

На рис. 1 приведены расчетные траектории движения частиц цементной пыли в плоскости  $xz$  в зависимости от следующих параметров задачи:  $W_0 = 0,3$  м/с;  $\Delta_x = 0,4$ ;  $\Delta_z = 0,1$ ;  $\omega_x = 0,1$  Гц;  $\omega_z = 0,04$  Гц;  $\rho_d = 2,4$  г/м<sup>3</sup>. На рис. 2 приведены расчетные траектории движения частиц пыли керамзита при тех же параметрах,  $\rho_d = 0,85$  г/м<sup>3</sup>.

Процесс оседания мелких взвешенных частиц под действием силы тяжести в турбулентном потоке складывается из двух процессов: непрерывного оседания частиц книзу внутри несущих их пульсационных молей и беспорядочного по направлению, частоте и амплитуде движения частиц со спусками и подъемами вместе с несущими их пульсационными полями [8—11].

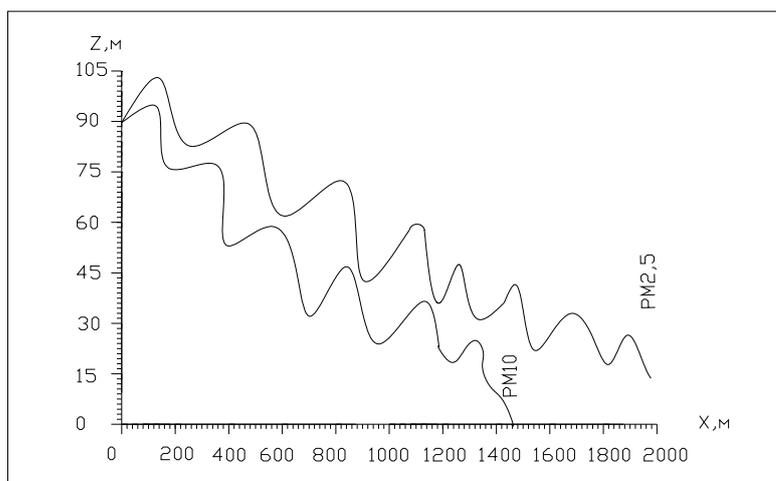


Рис. 1. Расчетные траектории оседания частиц пыли цемента плотностью  $\rho_d = 2,4 \text{ г/м}^3$  различного диаметра с высоты 90 м

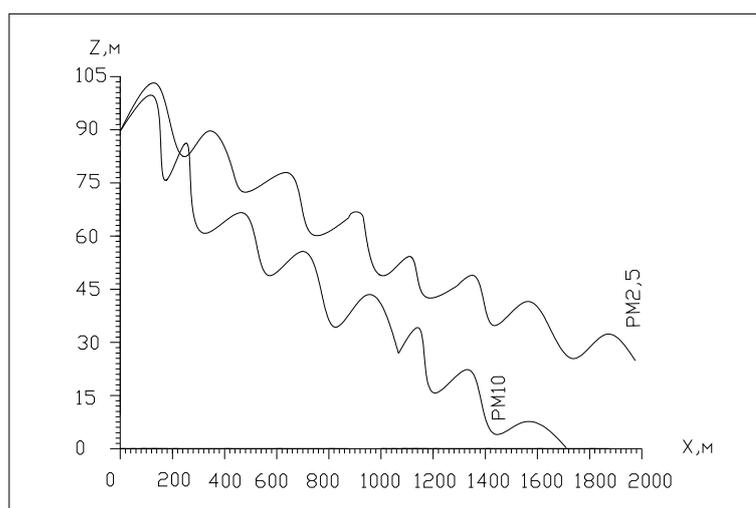


Рис. 2. Расчетные траектории оседания частиц пыли керамзита плотностью  $\rho_d = 0,85 \text{ г/м}^3$  различного диаметра с высоты 90 м

Уравнение вертикального движения стоксовской частицы в горизонтальном потоке с учетом силы тяжести имеет вид

$$\frac{dv_p}{dt} + \beta v_p = \beta V' \sin \omega t - g; \quad \sigma_p(0) = 0,$$

где  $v_p$  — скорость оседания частицы;  $t$  — рассматриваемый момент времени;  $\beta$  — фактор инерционности частицы, называемой иногда «постоянной времени»;  $\omega$  — лангранжевая частота пульсации;  $V'$  — амплитуда попереч-

ной составляющей скорости пульсаций турбулентного потока. Его решение можно представить в следующем виде:

$$v_p = -\tau g + \frac{V' \sin(\omega t - \varphi)}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} + \frac{\omega \tau V' e^{-t/\tau}}{1 + \omega^2 \tau^2}.$$

Полученная зависимость описывает скорость оседания с учетом пульсации турбулентного потока. Однако она не учитывает конвективную турбулентность в атмосфере, которая играет существенную роль при распространении примесей.

В соответствии с [12] при описании движения частицы в нагретом потоке следует учитывать наравне с подъемом лобовое сопротивление, тогда можно записать

$$m \frac{dv}{dt} = gm \frac{T^1 - T}{T} - Fc \frac{\rho}{2} v^2 - mg,$$

где  $m$  — масса частицы пыли;  $F$  — поперечное сечение частицы пыли;  $c$  — коэффициент сопротивления;  $\rho$  — относительная плотность частицы;  $v$  — скорость подъема;  $T^1$  — начальная температура воздуха у поверхности земли;  $T$  — средняя температура слоя.

Массу частички пыли можно найти по формуле

$$m = 1/6 \pi d^3 \rho,$$

где  $d$  — диаметр частицы;  $\rho$  — плотность частицы пыли.

Коэффициент сопротивления определяется по формуле Клячко [13]:

$$c = \frac{24}{Re_g} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re_n}},$$

где  $Re_g$  — число Рейнольдса для частицы.

Тогда

$$\frac{dv}{dt} = g \frac{T^1 - T}{T} - \frac{3c}{4d} \rho v^2 - mg.$$

Для установившегося движения получаем

$$v = 3,68 \sqrt{\frac{d}{c} \left( \frac{T^1 - T}{T} - 1 \right)}.$$

Тогда скорость оседания описывается уравнением

$$v_p = -\tau g + \frac{V' \sin(\omega t - \varphi)}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} + \frac{\omega \tau V' e^{-t/\tau}}{1 + \omega^2 \tau^2} - 3,68 \sqrt{\frac{d}{c} \left( \frac{T^1 - T}{T} - 1 \right)}.$$

Путь, пройденный частице по горизонтали,  $L_{гор}$ , можно оценить по зависимости [7]

$$L_{\text{гор}} = \frac{HV_p}{0,0042d_q}$$

Полученные зависимости позволяют уточнить территорию, на которой возможно оседание пыли, особенно мелкодисперсной, при оценке вреда.

Особое внимание при оценке вреда следует уделять предприятиям, со стороны которых происходит систематическое увеличение уровня негативного воздействия на окружающую среду, и зачастую работающих на неэффективном оборудовании.

На среднесрочный период в России одной из главных задач проблем экологии должно стать применение наилучших существующих технологий (НСТ) при формировании принципа нормирования предельно-допустимого воздействия на окружающую среду [14—16].

Был проведен анализ применяемого в строительной индустрии пылеочистного оборудования с позиции эффективного улавливания твердых частиц, прежде всего мелкодисперсных, и выполнения требований по  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$ , а также предложены наиболее доступные технология для данной отрасли стройиндустрии. В качестве примера рассмотрены различные системы: циклон; циклон + циклон; аппарат ВЗП + инерционная система; циклон + фильтр; аппарат ВЗП + фильтр; инерционная система + фильтр.

Анализ рассмотренных систем пылеулавливания показал, что наиболее эффективной и, соответственно, наиболее доступной технологией для предприятий стройиндустрии является система, состоящая из аппарата ВЗП и фильтра, установленных последовательно. Степень улавливания частиц менее  $PM_{10}$  составила 84 %, а  $PM_{2,5}$  — 15 % (табл.).

*Эффективность систем пылеулавливания*

Система пылеулавливания	Эффективность улавливания, $\eta$			
	ЖБИ		Цементное производство	
	$\eta(D_{50})$	$\eta(D_{95})$	$\eta(D_{50})$	$\eta(D_{95})$
Циклон	74	70...78	72	70...74
Циклон + циклон	84	78...88	82	80...84
Аппарат ВЗП	87	82...92	86	82...90
Инерционная система	85	82...88	80	78...82
Циклон + фильтр	92	88...96	92	88...96
Аппарат ВЗП + фильтр	95	92...98	95	92...98
Инерционная система + фильтр	88	86...90	82	80...84

#### **Выводы:**

1. Обоснован и научно разработан методический подход к оценке экологического вреда от выбросов предприятий, в том числе предприятий строительного комплекса, с учетом диаметра содержащихся в выбросах частиц.

2. Уточнена математическая модель, описывающая распространение твердых частиц, содержащихся в выбросах строительных производств, в горизонтальном турбулентном потоке с учетом конвективной турбулентности.

3. Дана оценка эффективности способов очистки выбросов предприятий строительной индустрии с позиций наиболее доступных технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба. М., 1999.
2. *Arcuri A.* Controlling environmental risk in Europe: the complementary role of an EC. Environmental liability regime. Tijdschriftvoor Milieuaansprakelijkheid, 2001.
3. Study on the Implementation Effectiveness of the Environmental Liability Directive (ELD) and Related Financial Security Issues, Final Report, prepared by Bio Intelligence Service, Service Contract 070307/2008/516353/ETU/G.1, European Commission, Brussels, November 2009.
4. *Bergkamp L.* The proposed EC Environmental Liability Regime and EC Law Principles // Environmental Liability — Law, Policy and Practice. 2001. № 9. Pp. 251—266.
5. *Kokott Juliane, Axel Klaphake und Simon Marr.* Ökologische Schäden und ihre Bewertung in internationalen, europäischen und nationalen Haftungssystemen // Eine juristische und ökonomische Analys. Berlin: Erich Schmidt Verlag., 2003.
6. Совершенствование методов расчета рассеивания пылевых выбросов на предприятиях стройиндустрии / В. Н. Азаров, Н. В. Мензелинцева, И. В. Кабаева, А. Г. Шестаков // Проблемы региональной экологии. 2006. № 6. С. 45—51.
7. *Азаров В. Н., Мензелинцева Н. В., Карапузова Н. Ю.* Об оценке доли частиц PM<sub>10</sub> и PM<sub>2,5</sub> в выбросах предприятий строительной отрасли // Вестник отделения строительных наук РААСН. 2012. Т. 2. С. 6—12.
8. Аэрозоли / К. Спурных, Ч. Йех, Б. Седлачек, О. Штрох. М., 1964. 352 с.
9. *Медников Е. П.* Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1981. 174 с.
10. *Crowe C. T., Troutt T. R., Chung J. N.* Numerical models for two-phase turbulent flows // Annual Review of Fluid Mechanics. 1996. Vol. 28. Pp. 11—43. DOI: 10.1146/annurev.fl.28.010196.000303
11. *Jacobson M. Z.* Fundamentals of Atmospheric Modeling. Cambridge: Academic Press, 1999. 217 p.
12. *Воронцов П. А.* Турбулентные и вертикальные токи в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1966. 296 с.
13. *Швыдкий В. С., Ладыгин М. Г.* Очистка газов. М.: Теплоэнергетик, 2002. 640 с.
14. *Воронин В. Н.* Параметры вентиляционной струи, характеризующие эффективность выноса пыли из горных выработок. Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1953. С. 97—114.
15. Council Directive 96/61/EC of 24 September 1996 concerning integrated pollution prevention and control. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31996L0061:EN:HTML>.
16. Directive 2008/1/EC of the European Parliament and of the Council of 15 January 2008 concerning integrated pollution prevention and control. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:024:0008:01:EN:HTML>.

© Михайловская Ю. С., Мензелинцева Н. В., Карапузова Н. Ю., Лактюшин В. А., Богомолов С. А., 2016

Поступила в редакцию  
в ноябре 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Научно-методический подход к определению экологического ущерба от выбросов предприятий строительного комплекса / Ю. С. Михайловская, Н. В. Мензелинцева, Н. Ю. Карапузова, В. А. Лактюшин, С. А. Богомолов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 189—198.

Об авторах:

**Михайловская Юлия Сергеевна** — аспирант кафедры безопасности жизнедеятельности в техносфере, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

**Мензелинцева Надежда Васильевна** — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой инженерной графики, стандартизации и метрологии, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, menzelintseva\_nv@mail.ru

**Карапузова Наталья Юрьевна** — канд. техн. наук, доц., Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, karapuzova-ny@mail.ru

**Лактюшин Вадим Анатольевич** — аспирант кафедры инженерной графики, стандартизации и метрологии, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

**Богомолов Сергей Александрович** — аспирант кафедры инженерной графики, стандартизации и метрологии, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

**Yu. S. Mikhailovskaya, N. V. Menzelintseva, N. Yu. Karapuzova, V. A. Laktyushin, S. A. Bogomolov**

## SCIENTIFIC-METHODOLOGICAL APPROACH TO THE ASSESSMENT OF ECOLOGICAL DAMAGE FROM EMISSIONS OF ENTERPRISES OF THE BUILDING COMPLEX

The article addresses the scientific-methodological approach to the assessment of ecological damage from emissions of the enterprises of the building complex that takes into account dust properties, distribution of dust particles in particular, as well as the use of the best existing technologies when assessing cost per unit on gas cleaning.

**Key words:** damage, dust of enterprises of the building industry, particle diameter.

### REFERENCES

1. *Vremennaya metodika opredeleniya predotvrashchennogo ekologicheskogo ushcherba* [Temporary methodology of determination of prevented environmental damage]. Moscow, 1999.
2. Arcuri A. *Controlling environmental risk in Europe: the complementary role of an EC. Environmental liability regime. Tijdschriftvoor Milieuaansprakelijkheid*, 2001.
3. *Study on the Implementation Effectiveness of the Environmental Liability Directive (ELD) and Related Financial Security Issues*. Final Report, prepared by Bio Intelligence Service, Service Contract 070307/2008/516353/ETU/G.1, European Commission, Brussels, November 2009.
4. Bergkamp L. The proposed EC Environmental Liability Regime and EC Law Principles. *Environmental Liability — Law, Policy and Practice*, 2001, no. 9, pp. 251—266.
5. Kokott Juliane, Axel Klaphake und Simon Marr. *Ökologische Schäden und ihre Bewertung in internationalen, europäischen und nationalen Haftungssystemen. Eine juristische und ökonomische Analys*. Berlin, Erich Schmidt Verlag., 2003.
6. Azarov V. N., Menzelintseva N. V., Kabaeva I. V., Shestakov A. G. Improvement of methods of calculation of dust emission dispersion at enterprises of construction industry. *Problemy regional'noi ekologii* [Regional Environmental Issues], 2006, no. 6, pp. 45—51.
7. Azarov V. N., Menzelintseva N. V., Karapuzova N. Yu. [About the assessment of proportion of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> particles in emissions by enterprises of construction industry]. *Vestnik otdeleniya stroitel'nykh nauk RAASN* [News of the construction sciences department of RAACS], 2012, vol. 2, pp. 6—2.
8. Spurnykh K., Iekh Ch., Sedlachek B., Shtrokh O. *Aerozoli* [Aerosols]. Moscow, 1964. 352 p.
9. Mednikov E. P. *Turbulentnyi perenos i osazhdenie aerozolei* [Turbulent transfer and aerosol deposition]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 176 p.
10. Crowe C. T., Troutt T. R., Chung J. N. Numerical models for two-phase turbulent flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1996, vol. 28, pp. 11—43. DOI: 10.1146/annurev.fl.28.010196.000303
11. Jacobson M. Z. *Fundamentals of Atmospheric Modeling*. Cambridge, Academic Press, 1999. 217 p.
12. Vorontsov P. A. *Turbulentnye i vertikal'nye toki v pogranichnom sloe atmosfery* [Turbulent and vertical currents in boundary atmosphere]. Leningrad, Gidrometeorologicheskoe Izdatel'stvo, 1966. 296 p.
13. Shvydkii V. S., Ladygichev M. G. *Ochistka gazov* [Gas purification]. Moscow, Teploenergetik Publ., 2002. 640 p.
14. Voronin V. N. *Parametry ventilyatsionnoi strui, kharakterizuyushchie effektivnost' vynosa pyli iz gornykh vyrabotok. T. 1* [Parameters of an air current that characterize the efficiency of dust

discharge out of mine working. Vol. 1]. Moscow, Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1953. Pp. 97—114.

15. Council Directive 96/61/EC of 24 September 1996 concerning integrated pollution prevention and control. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31996L0061:EN:HTML>.

16. Directive 2008/1/EC of the European Parliament and of the Council of 15 January 2008 concerning integrated pollution prevention and control. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:024:0008:01:EN:HTML>.

*For citation:*

Mikhailovskaya Yu. S., Menzelintseva N. V., Karapuzova N. Yu., Laktyushin V. A., Bogomolov S. A. [Scientific-methodological approach to the assessment of ecological damage from emissions of enterprises of the building complex]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 189—198.

*About authors:*

**Mikhailovskaya Yuliya Sergeevna** — Postgraduate student of Life Safety in Technosphere Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

**Menzelintseva Nadezhda Vasil'evna** — Doctor of Engineering Science, Professor, Head of Engineering Graphics, Standardization and Metrology Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, menzelintseva\_nv@mail.ru

**Karapuzova Natal'ya Yur'evna** — Candidate of Engineering Science, Docent, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, karapuzova-ny@mail.ru

**Laktyushin Vadim Anatol'evich** — Postgraduate student of Engineering Graphics, Standardization and Metrology Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

**Bogomolov Sergei Aleksandrovich** — Postgraduate student of Engineering Graphics, Standardization and Metrology Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

УДК 005:331.461

**О. П. Сидельникова**

*Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

## **ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫМИ РИСКАМИ**

Управление производственными рисками является необходимой составляющей эффективной системы промышленной безопасности и охраны труда. Среди мер, содействующих безопасности и гигиене труда, приоритетное значение отводится превентивному определению опасных и вредных факторов производственных процессов. Важно предусматривать выявление, оценку и снижение уровней профессиональных рисков.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** опасные и вредные факторы, аварийность и травматизм, профессиональные заболевания, профессиональный риск, охрана труда, промышленная безопасность, комфортные и безопасные условия труда, управление профессиональными рисками, критерии оценки риска.

Научно-технический прогресс привносит в мир новые опасности в связи с расширением спектра опасных факторов в традиционных отраслях промышленности, ростом энергонасыщенности производств, давлений и температур в промышленных и транспортных коммуникациях, освоением новых сырьевых баз или способов производства. При этом увеличение масштабов последствий сопровождается уменьшением вероятности отдельно взятых негативных событий. Характерная для технического прогресса смена техники, систем управления, интенсификация технологических процессов объективно усложняют взаимодействие в системах «человек — машина — окружающая среда», что становится одной из основных причин аварий, несмотря на то, что надежность технических систем несомненно повышается. В концепции национальной безопасности Российской Федерации, утвержденной Президентом РФ 17 декабря 1997 г., в качестве угроз национальной безопасности отмечен рост вероятности техногенных катастроф, а одним из основных направлений обеспечения национальной безопасности — переход к экономическому росту при снижении уровня такой вероятности. В настоящее время в качестве основных факторов, негативно влияющих на состояние промышленной безопасности, выделяется физический износ производственных сооружений и оборудования [1—4]. Анализ показывает, что в последние годы использование изношенных фондов вовсе не определяет общий уровень аварийности. Наблюдается устойчивая тенденция снижения производственного травматизма в стране. Это следствие деятельности всех систем обеспечения промышленной безопасности, ориентированных на борьбу с растущей опасностью. Изменение положения с промышленной безопасностью и охраной труда требует и смены парадигмы промышленной безопасности, которая должна быть ориентирована прежде всего на дальнейшее уменьшение опасности.

Очевидно, что дальнейшие достижения в области промышленной безопасности и охраны труда связаны, прежде всего, с совершенствованием систем управления. При этом достижения в развитии технических средств сохраняются.

Опыт крупнейших мировых компаний показывает, что охрану труда высшие руководители считают одним из главных приоритетов. Так, из десятков показателей деятельности предприятия охрану труда и здоровья своих работников они ставят на второе место, сразу после квалификации и компетентности персонала. В странах Европейского союза сейчас поднимается вопрос о культуре охраны труда, которая является одним из главных элементов управления предприятием.

Изучение и решение проблем, связанных с обеспечением здоровых и безопасных условий, в которых протекает труд человека, — одна из наиболее важных задач в разработке новых технологий и систем производства. Выявление и изучение возможных причин производственных несчастных случаев, профессиональных заболеваний, аварий, взрывов, пожаров, разработка мероприятий и требований, направленных на устранение этих причин, позволяют создать безопасные и благоприятные условия для труда человека. Комфортные и безопасные условия труда — один из основных факторов, влияющих на производительность и безопасность труда, здоровье работников.

Идея необходимости поддержания безопасности производства и охраны здоровья работников была сформулирована еще в 1966 г. в ст. 7 Международного пакта об экономических, социальных и культурных правах. Пакт впервые дал расшифровку права каждого человека на благоприятные условия труда, которое было заложено в ч. 1 ст. 23 Всеобщей декларации прав человека (1948 г.), в числе которых было названо право работников на «труд в условиях, отвечающих требованиям безопасности и здоровья» («safe and healthy working conditions»).

Несмотря на ряд прогрессивных решений в области охраны и безопасности труда, ситуация с уровнем профессиональных заболеваний и травматизмом, в том числе со смертельным исходом, остается в РФ напряженной [5].

На рис. 1, 2 показаны результаты исследований травматизма на предприятиях различных форм собственности и распределения травматизма по отраслям производства, приведенных в работе [6].

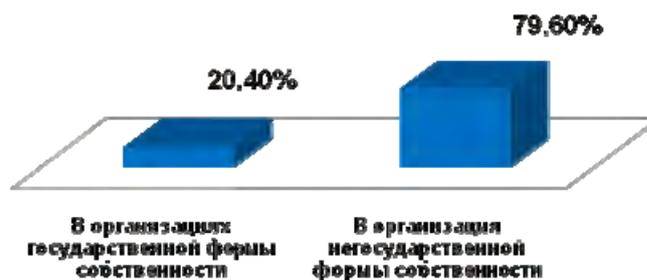


Рис. 1. Травматизм на предприятиях различных форм собственности

Наиболее неблагоприятная тенденция в организациях негосударственной формы собственности, строительство также относится к наиболее опасным отраслям экономики. В структуре травматизма по видам экономической деятельности доля строительной отрасли достаточно велика и имеет тенденцию к опережающему по сравнению с другими отраслями росту.

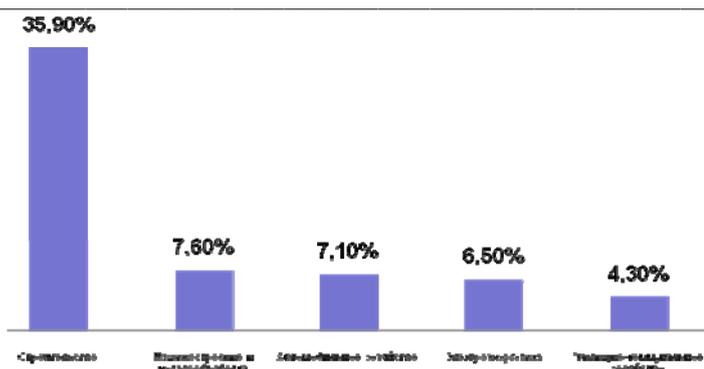


Рис. 2. Распределение травматизма по отраслям производства

Статистические данные свидетельствуют, что случаи аварий и травматизма в строительстве чаще всего происходят по организационным причинам, в результате неправильных действий (ошибок или бездействия) как рабочих, так и инженерно-технических работников, формальных подходов и снижения требований к системам управления охраной труда в строительных организациях.

По данным авторов [7] с 2000-х годов в России наблюдался рост производственного травматизма со смертельным исходом (табл.).

*Количество пострадавших со смертельным исходом в результате несчастных случаев на производстве в РФ*

Год	Количество пострадавших со смертельным исходом (чел.) по данным		
	Роструда	Фонда социального страхования	Росстатата
2003	5185	5180	3536
2004	4924	3684	3292
2005	4604	4235	3091
2006	4520	3591	2881
2007	4583	3677	2966
2008	3235	—	—

Основными причинами данного явления стали техногенные аварии в угледобывающей отрасли, гидроэнергетике, а также увеличение числа погибших в строительстве. Данная тенденция была нарушена только резким падением производства. При этом рост производственного травматизма со смертельным исходом именно в строительстве приобрел системный характер. Наблюдается рост как общего количества погибших, так и числа погибших на 1000 работающих.

На сегодняшний день системный подход к охране труда, производственной безопасности предусматривает одновременный мониторинг и учет множества разнородных рисков.

Совершенствование систем управления связано с переходом от принципа реагирования на выявление опасности и поиску угроз. Причем поиск угроз или опасностей должен проводиться для каждого производства, установки,

вида деятельности, рабочего места. И раз уж речь идет о совершенствовании системы управления, то необходим поиск опасности и в нормативных документах — в каждом регламенте, процедуре и инструкции.

Профессиональный риск тесно связан с неопределенностью и вероятностными характеристиками объектно-субъектных взаимосвязей: проявлением сложного комплекса взаимоувязанных факторов условий труда и трудового процесса (воздействие технической системы на человека), биологического состояния человека и его здоровья (восприятие рисков), развитости механизмов и институтов защиты от рисков (охрана и медицина труда, социальное страхование и реабилитационное обеспечение) [8]. Каждую из этих сфер риска — формирующую профессиональный риск (техническая система), воспринимающую риск (профессиональные группы работников) и управляющую риском (институты техники безопасности, охраны и медицины труда, страхования) важно изучать как по отдельности, так и в комплексе: в форме результирующего эффекта взаимодействия существующих видов и уровней рисков, субъектов рисков и культуры управления безопасностью.

С позиций медицины труда (гигиены труда и профессиональной заболеваемости) профессиональный риск рассматривается в аспекте установления количественных закономерностей возникновения профессиональной заболеваемости работников и разработки механизмов ее предупреждения. При этом изучаются факторы производственной среды (шум, вибрация, химические и биологические вещества, радиационное и другие виды проникающего излучения и т. д.) и трудового процесса (интенсивность труда, темп работы и т. д.) как источники повреждения здоровья. Данный подход зафиксирован в определении профессионального риска, предложенном Всемирной организацией здравоохранения: риск — это математическая концепция, отражающая ожидаемую тяжесть и/или частоту неблагоприятных реакций организма человека на данную экспозицию вредного фактора производственной среды. Уровень риска определяется путем сравнения степени распространения тех или иных заболеваний по определенным профессиональным группам работающих в конкретных условиях труда (экспозиция факторов производственной среды, класс опасности веществ и превышение их уровня по отношению к санитарным нормам).

С позиции техники безопасности и охраны труда профессиональный риск рассматривается в аспекте выявления факторов риска (техника, технология и вид производства, организация труда, профессиональная подготовка персонала и проведение профилактической работы по охране труда), влияющих на уровень производственного травматизма, и разработки технических и организационных мер по его снижению.

Таким образом, с позиции медицины, охраны труда и техники безопасности оценка профессионального риска представляет собой анализ причин его возникновения и масштабов влияния на профессиональные группы работающих в отдельных отраслях экономики.

В общем случае, поиск опасностей — одна из составляющих методологии анализа риска. И методология эта достаточно развита. Особенно это касается анализа риска объектов и производств. А вот применение данной методологии для анализа систем управления требует дальнейших разработок. Ведь анализ опасностей — один из основных элементов систем управления

промышленной безопасностью, охраной труда и охраной окружающей среды в соответствии с международными стандартами.

В проблеме управления можно выделить по крайней мере три основных компонента [9]:

1. Объект, система, процесс, явление, феномен, ситуация, агрегат, механизм, аппарат, машина, устройство и т. д., которыми мы желаем управлять.
2. Человек или группа людей, которые могут или должны управлять.
3. Набор методов, средств, приемов, способов, структур, схем, систем, устройств, приспособлений, инструментов, с помощью которых мы, воздействуя на то, чем мы управляем, реализуем доминирование и контроль и достигаем поставленных целей.

С первыми двумя позициями затруднений нет, так как всегда есть то, чем надо управлять, и есть те, кто хочет или должен управлять. Есть риски, уровнем которых надо управлять, и есть люди, которые понимают, что надо научиться это делать. Намного все сложнее с третьей позицией [9, 10].

На сегодняшний день можно выделить следующие способы управления риском: организационные, технические, технологические, экономические, рыночные, командно-административные, информационные, интеллектуальные, комбинированные. Ни один из этих способов, взятый в отдельности, проблему управления риском не решает. Чаще всего приходится применять несколько методов, используя наработки многих наук, т. е. междисциплинарный подход. Решением этой задачи занимается наука об управлении, которая, в свою очередь, распадается на ряд отдельных направлений. К этой науке тесно примыкает наука о принятии решений [11].

Реализация государственной социальной политики по обеспечению здоровья и безопасности работников предполагает усиление деятельности по снижению рисков профессиональной заболеваемости и производственных травм, осуществлению мероприятий профилактической направленности [12]. Один из самых перспективных и эффективных подходов — методика оценки и управления профессиональными рисками на уровне предприятий. Во многих странах этот инструмент позволяет добиться исключительных результатов и желанной цели — рабочих мест без травм и профзаболеваний, повышения производительности труда и сокращения затрат.

Управление профессиональными рисками – комплекс взаимосвязанных мероприятий, включающих в себя меры по выявлению, оценке и снижению уровней профессиональных рисков. Без создания системы, отслеживающей состояние условий и охраны труда, производственной безопасности в динамике, причины производственного травматизма и профессиональной заболеваемости, невозможно эффективно управлять производственными рисками.

По оценкам Международной организации труда, в среднем на один несчастный случай производственного травматизма приходится от 500 до 2000 легких и тяжелых случаев («пирамида несчастных случаев»). Если исходить из этого соотношения, то в РФ в настоящее время общий производственный травматизм должен составлять от 3 до 6 млн, а возможно и более, несчастных случаев в год (по официальной статистике — около 150...200 тыс.), так как смертельный травматизм равен 6...7 тыс. случаев [13, 14]. При этом в странах ЕС нетрудоспособность по травматизму считают, начиная с четвертого дня, а

в России — с первого, т. е. несоответствие между данными статистики и возможным числом несчастных случаев будет еще больше.

За последние годы Россия полностью или частично ратифицировала ряд международных конвенций в данной сфере, в частности Конвенцию № 148 «О защите работников от профессионального риска, вызываемого загрязнением воздуха, шумом и вибрацией на рабочих местах», Конвенцию № 155 «О безопасности и гигиене труда и производственной среде», Конвенцию № 160 «О статистике труда» и др. Ратификация конвенций предусматривает особые обязательства по их выполнению. Вместе с тем, говоря о Конвенции № 155, нельзя не упомянуть о Протоколе к ней от 2002 г., пока еще не ратифицированном Россией. Этот Протокол содержит требования по регистрации и уведомлению о несчастных случаях на производстве, профессиональных заболеваниях, аварийных ситуациях, несчастных случаях в пути на работу и с работы, а также о предполагаемых случаях профессиональных заболеваний. Однако в нынешних условиях обязанность публиковать общенациональную статистику по производственному травматизму и профзаболеваниям, закрепленная в статьях № 6 и 7 Протокола, не лучшим образом отразится на имидже России.

В соответствии с принципами безопасности методология обеспечения безопасного использования технических систем, производственных объектов должна строиться на основе системного подхода, заключающегося в комплексном рассмотрении потенциального источника техногенной опасности (характеристик, свойств) и факторов защиты (защитных ресурсов, мер).

Вкладом в реализацию Федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» и определенным шагом на пути решения проблемы оценки риска следует считать разработку Методических указаний по проведению анализа риска опасных промышленных объектов (РД 08-120-96), утвержденных Ростехнадзором России 12.07.96 г. Риск или степень риска рассматривается как сочетание частоты (вероятности) и последствий конкретного опасного события [4]. Математическое выражение риска  $P$  — это соотношение числа неблагоприятных проявлений опасности  $n$  к их возможному числу  $N$  за определенный период времени:

$$P = n / N.$$

Помимо этого используется понятие «степень риска»  $R$ , т. е. вероятность наступления нежелательного события с учетом размера возможного ущерба от события. Степень риска можно представить как математическое ожидание величины ущерба от нежелательного события:

$$R(m) = \sum_{i=1}^n p_i m_i,$$

где  $p_i$  — вероятность наступления события, связанного с ущербом;  $m_i$  — случайная величина ущерба, причиненного экономике, здоровью и т. п.

Для прогнозирования и оценки риска применяются различные методы сетей, графов, дерева причинно-следственной связи и т. п. В методических указаниях Госгортехнадзора РФ приведены характеристики качественных и количественных методов, наиболее используемых при анализе риска. В ука-

заниях отмечена сложность реализации количественных методов и невысокая точность результатов. Однако необходимость иметь количественные показатели риска при прогнозировании объектов, оценка воздействия опасных факторов и определение приоритета защитных мероприятий требует дальнейшей разработки количественных методов оценки риска. Относительно просто и наглядно прогнозирование индивидуального и социального риска может быть представлено с помощью математической вероятностной модели с использованием ЭВМ. Рабочее пространство — площадка рабочего помещения предприятия предполагается прямоугольной формы с размерами: длина (вдоль оси  $X$ ) и ширина (вдоль оси  $Y$ ). За начало координат принят угол площадки, отображаемый на экране ЭВМ слева внизу. Все параметры имеют единую размерность (м). Производственный агрегат (источник опасности) принимается в виде точки центр агрегата с координатами  $(X, Y)$ .

Вероятность аварии рассчитывается так же, как для сложного объекта, в работе которого  $N_c$  этапов с задействованием  $N_{ci}$  систем на  $i$ -м этапе. Причем каждой  $j$ -й системе соответствует вероятность ее отказа  $P(G_{ij})$ . Каждая система может иметь отказы при работе в разных комбинациях.

Для каждой такой комбинации определяется вероятность возникновения аварии. Этапы работы агрегата принимаются независимыми друг относительно друга. Опасная зона, характеризующая воздействие опасных факторов на человека, имеет центр в точке нахождения агрегата  $(X_A, Y_A)$  и считается экспоненциально распределенной с параметром  $\lambda$ . Такое распределение достаточно хорошо описывает картину аварийной ситуации, так как именно по такому закону затухает скорость разлетающихся обломков, происходит диффузия токсичных паров и газов и т.д. Вероятность воздействия опасных факторов определяется по формуле

$$R_A(x, y) = P(A_{ik})R(x, y) = P(A)\lambda e^{-\lambda r},$$

где  $P(A_{ik})$  — вероятность аварии агрегата при  $k$ -й комбинации работы систем на  $i$ -м этапе;  $R(x, y)$  – вероятность воздействия поражающего фактора в точках  $(x, y)$  при аварии.

Персонал объекта имеет численность  $N_w$ , у каждого сотрудника есть рабочее место с координатами  $(X_k, Y_k)$ . Поле распределения персонала в рабочем помещении около источника опасности задается нормальным распределением с параметром  $\sigma_k$ . Это подтверждается многолетними исследованиями. Вероятность нахождения  $k$ -го сотрудника в точках  $(x, y)$ :

$$P_{wk}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_k^2} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{(x-X_k)^2}{\sigma_k^2} + \frac{(y-Y_k)^2}{\sigma_k^2}\right]}.$$

В соответствии с этим индивидуальный риск рассчитывается по формуле

$$R_k = \sum_{x_i} \sum_{y_i} P_{wk}(x_i, y_i) R_A(x_i, y_i),$$

где  $x_i, y_i$  определяются экранном растром как сетка с шагом  $h$ :

$$h = \frac{\max(L, H)}{100},$$

где  $L$  — длина;  $H$  — ширина рабочей площади.

Социальный риск, т. е. вероятность гибели  $n$  человек, задается зависимостью

$$R_n = \sum_{k=1}^{N_w} \left[ \sum_{x_i} \sum_{y_i} P_{WK}(x_i, y_i) R_A(x_i, y_i) \right].$$

Для расчета индивидуального и социального риска на промышленном предприятии на основе представленной математической модели необходимы исходные данные для расчета. Эти данные принимаются с учетом специфики рассматриваемого производственного объекта и включают:

размеры рабочей площади (длина, ширина);

координаты:

агрегата (источника опасности)  $X$  и  $Y$ ;

рабочего места каждого сотрудника ( $X_k, Y_k$ );

количество:

сотрудников  $N_w$ ;

этапов в работе агрегата  $N_C$ ;

систем  $N_{si}$ , работающих на  $i$ -м этапе;

временных отсутствий сотрудников на рабочем месте ( $\sigma_k$ );

вероятность:

отказа агрегата  $P(A_{ik})$  при  $k$ -й комбинации отказов на  $i$ -м этапе;

параметр распределения опасной зоны  $\lambda$ .

На основе заданных параметров и принятых математических зависимостей рассчитывают вероятность аварии на техническом объекте, распределение персонала и опасной зоны по объекту, а также индивидуальный и социальный риски.

Направлением развития рассматриваемого вероятностного метода следует считать исследование изменений параметра опасной зоны  $\lambda$ , характеризующего воздействие опасных факторов (ударная волна, диффузия токсичных веществ, разлет осколков при взрыве и т. п.), а также уточнение параметра экспоненциального распределения по фактическим данным о параметре опасной зоны.

Предлагаемый метод анализа риска позволяет прогнозировать распределение опасных зон при аварии; работников на объекте при аварии (вероятностное); индивидуального и социального рисков для работников на производственной площади (закономерность).

Прогнозирование риска дает возможность информировать работников о риске, повышать эффективность разрабатываемых мер защиты персонала при аварии, а также предотвращать негативные последствия аварий.

Процедуру оценки рисков необходимо организовывать и применять для того, чтобы помочь работодателям или их представителям, контролирующим производимую работу [15]:

определить угрозы, имеющиеся в рабочем процессе, и оценить связанные с ними риски, чтобы, соблюдая требования существующего законода-

тельства, определить, какие мероприятия необходимы для обеспечения безопасности и сохранности здоровья работников и других лиц;

оценить риск, чтобы, основываясь на полученной информации, правильно организовать работу, выбрать необходимые для работы оборудование, химические вещества, материалы и т. п.;

проверить, адекватны ли осуществляемые мероприятия по охране труда;

определить приоритеты деятельности, если в результате оценки была установлена необходимость в дальнейших мероприятиях;

показать работникам и их представителям, что все факторы, связанные с работой, приняты во внимание, а также приняты все необходимые меры для организации безопасного труда;

обеспечить сохранение здоровья и повышение уровня безопасности работающих при помощи превентивных мероприятий, методов и приемов работы, которые были признаны необходимыми и внедрены после проведения оценки рисков.

Уровень риска на рабочем месте необходимо оценивать каждый раз, когда происходят какие-либо изменения, влияющие на факторы риска, например: вводится новый технологический процесс, оборудование, сырье или материалы; изменяется организация труда или вводятся новые рабочие ситуации, в том числе перемещение рабочих мест в новые мастерские или другие помещения.

При оценке риска и устранении его последствий, а также проведении корректирующих мероприятий важно, чтобы при оптимизации существующих рисков не создавались новые. Например, сомнительны преимущества, которые будут получены после покрытия окон пленкой для снижения наружного шума, если при этом не будет обеспечена должная вентиляция.

Важно, чтобы риск не был перенесен на другое место. Например, чтобы вентиляционные выбросы токсичных веществ, выводимых из одного помещения, не угрожали другому помещению или общественному месту.

Производя общую оценку, необходимо:

определить риски, которые возможно уменьшить или устранить. Во многих случаях это сделать невозможно, но риски всегда надо принимать во внимание;

определить те риски, которые хорошо известны и по отношению к которым можно легко определить и осуществить контрольные мероприятия;

обдумать действия, необходимые для более детальной оценки риска в случаях неординарных ситуаций в рабочем процессе (возможность аварии, пожара или взрыва).

О состоянии безопасности объекта можно судить по основанию «пирамиды безопасности», а не по ее вершине. Чтобы знать основание пирамиды, нужно регистрировать даже нарушения и опасные ситуации [16]. Технически тут никакой сложности нет, необходима только нацеленность на поиск опасностей на всех уровнях.

В конце концов, невозможно судить о безопасности объекта или установки по тому, что риск на нем равен  $10^{-5}$  или  $10^{-6}$ , тем более что опасность объекта постоянно меняется. Все-таки о безопасности судят по нарушениям требований промышленной безопасности и охраны труда [3]. Зато эти требования должны учитывать результаты риск-анализа, особенно по спорным

моментам. Необходимо искать опасности и использовать результаты анализа риска для ужесточения требований при чрезмерном риске. Однако и нормативный документ может таить угрозу, в идеале каждое его изменение должно сопровождаться исследованием на предмет опасности. Для этого необходимо задавать правильные вопросы и использовать методы анализа нормативных документов. Вообще, звучащий все чаще призыв специалистов создать практический риск-анализ является актуальным. Необходимо разрабатывать методы анализа риска конкретных объектов и установок, делая упор на довольно простые качественные методы, позволяющие выявлять опасности, что составляет основу систем управления. Однако при создании современных систем управления безопасностью требуется не только качественный, но и количественный анализ риска. Без вероятностных характеристик не обойтись при оценке эффективности мероприятий по охране труда и промышленной безопасности.

Еще одна задача риск-анализа — выбор критериев приемлемого риска, что напрямую связано с определением целей систем управления безопасностью.

Анализ риска является ключевым элементом системы управления промышленной безопасностью. Это последняя оставшаяся инженерная мера, с помощью которой можно усовершенствовать указанную систему и добиться снижения аварийности и травматизма. После того как и эти возможности будут использованы, останутся только меры, связанные с пересмотром самого отношения персонала к безопасности, работе и жизни вообще — тем, что определяется понятием «культура безопасности» [17].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Платонов С. А.* Безопасное использование техники // *Безопасность жизнедеятельности*. 2001. № 5. С. 6—11.
2. *Мокроусов С. Н.* Современные подходы к обеспечению безопасности функционирования производственных объектов нефтегазового комплекса // *Безопасность труда в промышленности*. 2006. № 3. С. 48—51.
3. *Мартынюк В. Ф.* Роль анализа риска в обеспечении промышленной безопасности // *Безопасность труда в промышленности*. 2007. № 4. С. 66—67.
4. *Сидельникова О. П., Чернышова Е. А., Руденко К. В.* Определение риска технической системы. Проблемы охраны производственной и окружающей среды: сборник материалов и научных трудов инженеров-экологов / сост. В. Н. Азаров; Волг. гос. архит.-строит. ун-т. Волгоград: ВолГАСУ, 2009. С. 126—131.
5. *Сидельникова О. П.* Проблемы безопасности труда в строительстве // *Интернет-вестник ВолГАСУ*. 2013. Вып. 2(27). Ст. 36. URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Sidelnikova-013\\_2\(27\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Sidelnikova-013_2(27).pdf).
6. *Стасева Е. В.* Совершенствование и повышение эффективности организации охраны труда на основе системы управления рисками: дис... канд. техн. наук. Волгоград, 2012. 196 с.
7. *Пушенко С. Л., Страхова Н. А.* Методология управления рисками охраны труда на предприятиях стройиндустрии. Ростов н/Д: ЗАО «Ростиздат», 2011. 298 с.
8. *Роик В. Д.* Профессиональный риск: проблемы анализа и управления // *Управление риском*. 2003. № 2. С. 9—14.
9. *Музалевский А. А.* Управление рисками // *Безопасность жизнедеятельности*. 2012. № 10. Приложение. С. 1—25.
10. *Музалевский А. А., Яйли Е. А.* Риск: анализ, оценка, управление. СПб: Изд-во РГГМУ, 2008. 232 с.
11. *Соложенцев Е. Д.* Сценарное логико-вероятностное управление риском в бизнесе и технике. СПб: Издательский дом «Бизнес-пресса», 2006. 537 с.

12. Леваиов С. П. Проблема перехода к управлению профессиональными рисками в РФ // Безопасность жизнедеятельности. 2012. № 1. С. 2—10.
13. Состояние условий и охраны труда в субъектах Российской Федерации, различных видах экономической деятельности в 2009 году и меры по их улучшению: сб. научно-аналитических материалов / под общ. ред. Н. П. Пашина. М. : ФГУ «ВНИИ охраны и экономики труда», 2010. 90 с.
14. Statistical analysis of socio-economic costs of accidents at work in the European Union. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2004. 115 p. URL: <http://europa.eu>.
15. Крюков Н. П., Истомин С. В., Турченко В. Н. Оценка профессиональных рисков // Справочник специалиста по охране труда. 2010. № 8. С. 26.
16. Козлов М. М., Прусенко Б. Е. Предупреждение аварий и несчастных случаев на основе применения системы регистрации опасных ситуаций // Нефть, газ и бизнес. 2003. № 4. С. 56—63.
17. Прусенко Б. Е., Козлов М. М. Роль лидерства и поведения людей в процессе управления охраной труда и промышленной безопасностью на предприятиях нефтегазовой отрасли // Нефть, газ и бизнес. 2005. № 7. С. 44—55.

© Сидельникова О. П., 2016

Поступила в редакцию  
в феврале 2016 г.

Ссылка для цитирования:

Сидельникова О. П. Проблемы управления профессиональными рисками // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 199—210.

Об авторе:

**Сидельникова Ольга Петровна** — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности в техносфере, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [sidelnikova-volg@mail.ru](mailto:sidelnikova-volg@mail.ru)

**O. P. Sidel'nikova**

## PROBLEMS OF PROFESSIONAL RISKS MANAGEMENT

Management of industrial risks is a necessary component of an effective management system of industrial safety and labor protection. Among the measures aiming to provide occupational safety and health, the priority is given to preventive detection of hazardous and harmful factors of production processes. It is important to provide for the identification, evaluation and lowering of occupational risks.

**Key words:** hazardous and harmful factors, accident risk and injury rate, occupational diseases, occupational risk, health and safety, industrial safety, comfort and safe working conditions, occupational risk management, risk assessment criteria.

## REFERENCES

1. Platonov S. A. [Safe use of equipment]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Health and safety], 2001, no. 5, pp. 6—11.
2. Mokrousov S. N. [Modern approaches to assurance of safety of production facility functioning in oil and gas sector]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Occupational safety in industry], 2006, no. 3, pp. 48—51.
3. Martynyuk V. F. [Role of risk analysis in industrial safety assurance]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Occupational safety in industry], 2007, no. 4, pp. 66—67.
4. Sidel'nikova O. P., Chernyshova E. A., Rudenko K. V. *Opredeleeniye riska tekhnicheskoi sistemy. Problemy okhrany proizvodstvennoi i okruzhayushchei sredy: sbornik materialov i nauchnykh trudov inzhenerov-ekologov* [Determination of risk of technical system. Problems of production and

environmental protection. Set of papers and research works of environmental engineers]. Volgograd, VSUACE Publ., 2009. Pp. 126 — 131.

5. Sidel'nikova O. P. [Issues concerning labour safety in construction industry]. *Internet-Vestnik VolgASU*, 2013, no. 2(27), paper 36. URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Sidelnikova-013\\_2\(27\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Sidelnikova-013_2(27).pdf).

6. Staseva E. V. *Sovershenstvovanie i povyshenie effektivnosti organizatsii okhrany truda na osnove sistemy upravleniya riskami* [Improvement and increase of efficiency of labour safety organization on the basis of risk management system. Cand. Eng. Sci. Diss.]. Volgograd, 2012. 196 p.

7. Pushenko S. L., Strakhova N. A. *Metodologiya upravleniya riskami okhrany truda na predpriyatiyakh stroiindustrii* [Methodology of risk management of labour safety at enterprises of construction industry]. Rostov-on-Don, "Rostizdat" CJSC, 2011. 298 p.

8. Roik V. D. [Professional risk: problems of the analysis and management]. *Upravlenie riskom* [Risk management], 2003, no. 2, pp. 9—14.

9. Muzalevskii A. A. [Risk management]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Health and safety], 2012, no. 10. Appendix. Pp. 1—25.

10. Muzalevskii A. A., Yaili E. A. *Risk: analiz, otsenka, upravlenie* [Risk: analysis, assessment, management]. Saint Petersburg, RSHU Publ., 2008. 232 p.

11. Solozhentsev E. D. *Stsenarnoe logiko-veroyatnostnoe upravlenie riskom v biznese i tekhnike* [Scenario logical and probabilistic risk management in business and engineering]. Saint Petersburg, "Biznes-pressa" Publishing House, 2006. 537 p.

12. Levashov S. P. [The problem of the transition to management of occupational risks in the Russian Federation]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Health and safety], 2012, no. 1, pp. 2—10.

13. *Sostoyanie uslovii i okhrany truda v sub"ektakh Rossiiskoi Federatsii, razlichnykh vidakh eko-nomicheskoi deyatel'nosti v 2009 godu i mery po ikh uluchsheniyu: sb. nauchno-analiticheskikh materialov / pod obshch. red. N. P. Pashina* [Pashin N. P., ed. State of conditions and labour safety in the subjects of the Russian Federation, different types of economic activity in 2009 and measures for their improvement. Set of scientific and analytical papers]. Moscow, "All-Union R&D Institute of Safety and Labour Economics" Federal State Institution, 2010. 90 p.

14. *Statistical analysis of socio-economic costs of accidents at work in the European Union*. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, 2004. 115 p. URL: <http://europa.eu>.

15. Kryukov N. P., Istomin S. V., Turchenko V. N. [Assessment of professional risks]. *Spravochnik spetsialista po okhrane truda* [Reference book of a labour safety specialist], 2010, no. 8. p. 26.

16. Kozlov M. M., Prusenko B. E. [Prevention of accidents and casualties based on the use of dangerous situations registration system]. *Neft', gaz i biznes* [Oil, gas and business], 2003, no. 4, pp. 56—63.

17. Prusenko B. E., Kozlov M. M. [Role of leadership and people's behavior in management of labour and industrial safety at enterprises of oil and gas industry]. *Neft', gaz i biznes* [Oil, gas and business], 2005, no. 7, pp. 44—55.

*For citation:*

Sidel'nikova O. P. [Problems of professional risks management]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 199—210.

*About author:*

**Sidel'nikova Ol'ga Petrovna** — Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of Life Safety in Technosphere Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [sidelnikova-volg@mail.ru](mailto:sidelnikova-volg@mail.ru)

УДК 502.3:504.5-03

**В. И. Беспалов<sup>а</sup>, О. В. Бурлаченко<sup>б</sup>, О. С. Гурова<sup>а</sup>, О. Н. Пармонова<sup>а</sup>, Е. П. Лысова<sup>а</sup>**

<sup>а</sup> *Ростовский государственный строительный университет*

<sup>б</sup> *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТИРУЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ТОКСИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ ОТХОДЯЩИХ И ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ ОБЪЕКТОВ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ**

Рассматривается гидродинамический метод очистки отходящих газов от токсичных загрязняющих веществ как последовательную реализацию четырех стадий процесса взаимодействия системы «газ — жидкость» как между собой, так и с окружающей средой на основе изучения физических особенностей протекания процесса. Предлагается математическое описание метода очистки на основе критериев экологической эффективности и энергоемкостного показателя.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** гидродинамический метод очистки отходящих газов, экологическая эффективность, энергоемкостный показатель, отходящие и выхлопные газы объектов городского хозяйства.

Большинство существующих в настоящее время методик расчета, проектирования и оценки эксплуатационных параметров инженерных комплексов снижения загрязнения воздушной среды базируется на использовании в качестве результирующего критерия эффективности реализации процесса в целом или отдельных его этапов [1—6]. Часто понятие эффективности идентифицируют с понятием коэффициента полезного действия (КПД), что противоречит классическому определению КПД как энергетической оценки процесса. Также монокритериальный выбор не позволяет наиболее полно охарактеризовать поведение системы и предложить пути управления ее поведением. Необходимость такого управления возникает каждый раз при выборе оптимального направления изменения устойчивости загрязняющих веществ как дисперсных систем в процессе снижения загрязнения воздушной среды. Кроме того, развитие современных средств снижения загрязнения воздушной среды позволяет сегодня предложить для достижения одного и того же значения требуемой эффективности несколько различных инженерных решений, что говорит о недостаточности использования в качестве оптимизационного критерия только эффективности. Поэтому в настоящее время оптимизация процесса является многокритериальной и предполагает использование помимо основного критерия (эффективности) группу дополнительных критериев: для оценки энергетической экономичности процесса — энергоемкостный показатель; для оценки устойчивой работы инженерной системы — показатель технологической надежности; для оценки затрат материальных и финансовых средств — показатель экономической эффективности. На наш взгляд, основными являются два критерия: экологическая эффективность и энергоемкостный показатель, которые использованы нами при разработке методики оценки и выбора максимально экологически эффективных и энергетически экономичных технологий очистки от токсичных компонентов отходящих и выхлопных газов, основанных на использовании гидродинамического метода.

Целью исследований являлась разработка математического описания экологической эффективности и энергоемкостного показателя гидродинамической очистки токсичных компонентов отходящих и выхлопных газов объектов городской среды. Для достижения поставленной цели нами решены следующие задачи:

рассмотрены токсичные вещества как дисперсные системы;

рассмотрен гидродинамический метод очистки отходящих газов от токсичных загрязняющих веществ на основе изучения физических особенностей протекания процесса;

выполнено математическое описание метода по экологической эффективности и энергетической экономичности как результирующих критериев выбора технологии очистки выбросов;

Методы исследования базируются на основных положениях теории вероятности и математической статистики, теории дисперсных систем, системном анализе, аналитическом обобщении известных научных и практических результатов и др.

Проведенные авторами исследования показывают, что процесс очистки отходящих газов промышленных и энергетических предприятий, коммунальных и бытовых энергетических установок, а также выхлопных газов транспортных устройств и мобильных энергетических установок от токсичных загрязняющих веществ в соответствии с предложенной физико-энергетической концепцией [1—5] может быть организован различными методами, характеризующимися соответствующей физической сущностью организуемого внешнего воздействия (аэродинамическим, гидродинамическим, механическим, оптическим, электромагнитным и др.). В свою очередь, каждый метод очистки может быть реализован различными способами, характеризующими физическую форму организации внешнего воздействия, а каждый способ — соответствующими различными видами реализации, которые характеризуют технологические параметры организации внешнего воздействия, каждый вид реализации — различными техническими средствами, представляющими собой конкретные устройства, в которых реализуется какая-либо комбинация «метод — способ — вид — технические средства» [5—7].

Задача выбора оптимальной из условий обеспечения требуемой экологической эффективности и максимальной энергетической экономичности технологии процесса очистки отходящих газов от токсичных загрязняющих веществ, определяемой методом, способом, видом и конкретным техническим решением, при таком их многообразии весьма важна для реальных производственно-технологических условий. Актуальность этой задачи подчеркивается еще и тем, что одного и того же значения экологической эффективности можно добиться практически любой их комбинацией.

По нашему мнению, выбор оптимальной технологии реализации процесса очистки отходящих газов для конкретного объекта городской среды должен базироваться на использовании в качестве оптимизационных критериев именно экологической эффективности и энергоемкостного показателя [6] при условии их математического описания для получения соответствующих зависимостей от параметров, характеризующих свойства токсичных загрязняющих веществ и окружающей воздушной среды, особенностей выброса токсичных компонентов, а также факторов, воздействующих на эти токсичные компоненты в процессе очистки.

В качестве примера в статье представлено выполненное нами математическое описание гидродинамического метода очистки отходящих газов от токсичных загрязняющих веществ низконапорным и высоконапорным орошением на основе изучения физических особенностей протекания рассматриваемого процесса. Учитывая, что технологические особенности низконапорного орошения связаны с получением капель диспергированной жидкости размером 300...1000 мкм при давлении 0,2...2,0 МПа, а высоконапорного орошения — размером 10...100 мкм при давлении 7,0...20,0 МПа, нами проведен анализ основных физических механизмов реализации этих процессов для оценки их эффективности с позиций теории массопереноса [8—12].

Известно [13, 14], что раствор газа в жидкости существует совместно с находящимся над жидкостью газом. При этом содержание газа в растворе зависит не только от рода газа и жидкости, а также давления, температуры и состава газовой фазы. В состоянии равновесия между концентрациями газа в обеих фазах устанавливается некоторое соотношение, характеризуемое константой фазового равновесия  $m$ , равной отношению концентрации в газовой фазе  $C_r$  к его концентрации в жидкой фазе  $C_ж$ :

$$m = \frac{C_r}{C_ж}$$

При отсутствии равновесия между фазами осуществляется процесс массопереноса вещества из одной фазы в другую. Массоперенос является сложным процессом, состоящим из переноса вещества в пределах каждой из фаз (массоотдача) и через границу раздела фаз.

Движущей силой процесса переноса вещества является отклонение системы от равновесия, т. е. градиент концентрации. В соответствии с законом Фика количество  $W$  газового компонента, переносимого в направлении  $z$  через поверхность  $F$  за единицу времени, составляет

$$W = -DF \frac{dC}{dz}$$

или

$$W = KF\Delta,$$

где  $\Delta$  — движущая сила;  $K$  — коэффициент массопереноса, представляющий собой количество вещества, переносимое из одной фазы в другую в единицу времени через единицу поверхности при движущей силе, равной единице, определяемый уравнением

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\beta_r} + \frac{m}{\beta_ж},$$

где  $\beta_r, \beta_ж$  — коэффициенты массоотдачи соответственно в газовой и жидкой фазе.

Проведенные исследования как отечественных, так и зарубежных авторов показали, что определение коэффициентов массоотдачи и массопереноса является наиболее сложным этапом при расчетах процессов очистки воздуха жидкостными системами и требует предварительных экспериментальных ис-

следований. Известные же зависимости по определению эффективности очистки не отражают особенностей взаимодействия газообразной и жидкой фаз в зависимости от их физико-химических свойств, технологических и производственных условий.

В то же время установлено, что очистка воздушных потоков жидкостными системами является сложным многостадийным и многофакторным процессом взаимодействия составляющих системы «частица загрязняющего вещества (ЗВ) — жидкость» как между собой, так и с окружающей средой и характеризуется группой зависимых и независимых параметров [7—11].

На основе рассмотрения процесса взаимодействия дисперсных фаз двух дисперсных систем как совокупности единичных процессов взаимодействия частицы ЗВ и капли жидкости можно предположить, что для эффективной очистки воздуха гидродинамическим методом орошения жидкостным аэрозолем необходимо выполнение четырех последовательных стадий, осуществляемых с определенной степенью вероятности.

Первая стадия процесса очистки орошением происходит при сближении частицы ЗВ с каплей до расстояний, на которых начинают действовать молекулярные силы взаимодействия этих частиц и жидкости. При этом необходимо учитывать одновременное действие турбулентных и диффузионных сил. Вторая стадия включает переход частицы ЗВ в область на границе раздела фаз. Основное влияние на этом этапе оказывают молекулярные, электростатические и диффузионные силы. Проникновение частицы ЗВ в объем жидкости характеризует третью стадию процесса, где необходимо учитывать диффузионные силы и протекание химических реакций между частицами ЗВ и жидкости. Четвертая стадия определяет осаждение капель с захваченными частицами ЗВ из воздушного потока за счет сил гравитации.

Для решения задачи по определению эффективности очистки воздуха гидроорошением применен вероятностный подход, учитывающий последовательную реализацию четырех выделенных стадий процесса, что математически выражается произведением вероятностей с использованием теории вероятностей и математической статистики. При этом под эффективностью того или иного этапа процесса будем понимать вероятность его осуществления.

Тогда общая формула эффективности процесса газоочистки гидроорошением имеет вид:

$$E_{\text{эф}}^{\text{ГО}} = [1 - (1 - E_{\text{сбл. турб}})(1 - E_{\text{сбл. диф}})] [1 - (1 - E_{\text{п. адс}})(1 - E_{\text{п. мол}})(1 - E_{\text{п. эл}})] \times \\ \times [1 - (1 - E_{\text{пр. диф}})(1 - E_{\text{пр. хим}})] E_0,$$

где  $E_{\text{сбл. турб}}$ ,  $E_{\text{сбл. диф}}$  — эффективность сближения частицы ЗВ с каплей соответственно за счет турбулентных и диффузионных сил;  $E_{\text{п. адс}}$ ,  $E_{\text{п. мол}}$ ,  $E_{\text{п. эл}}$  — эффективность перехода частицы ЗВ в область на границе раздела фаз за счет соответственно адсорбционных, молекулярных и электростатических сил;  $E_{\text{пр. диф}}$ ,  $E_{\text{пр. хим}}$  — эффективность проникновения частицы ЗВ в объем жидкости за счет соответственно диффузионных и химических сил;  $E_0$  — эффективность оседания капель с захваченными частицами ЗВ из воздушного потока за счет сил гравитации.

Рассмотрим постадийные эффективности процесса очистки.

Эффективность сближения частицы ЗВ с каплей за счет диффузии определяют как отношение числа частиц ЗВ, сблизившихся с каплей, к общему числу этих частиц в активной зоне взаимодействия:

$$E_{\text{сбл. диф}} = 1 - \exp\left(-\frac{n_0^{\text{диф}}}{\Sigma n}\right).$$

Тогда, производя преобразования, получим следующее:

$$E_{\text{сбл. диф}} = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\frac{3D_q Q_n h_\phi}{r_k^2 v_k Q_r} \text{Re}_k^{\frac{1}{3}} \text{Sc}^{\frac{1}{3}}\right), & \text{при } \text{Re}_k < 100; \\ -\exp\left(-\frac{2,4D_q Q_n h_\phi}{r_k^2 v_k Q_r} \text{Re}_k^{\frac{1}{2}} \text{Sc}^{\frac{1}{2}}\right), & \text{при } \text{Re}_k = 600 \dots 2600; \\ 1 - \exp\left(-\frac{2,85D_q Q_n h_\phi}{r_k^2 v_k Q_r} \text{Re}_k^{\frac{1}{2}} \text{Sc}^{\frac{1}{3}}\right), & \text{при } \text{Re}_k = 100 \dots 600, \end{cases}$$

где  $D_q$  — средний медианный диаметр частиц ЗВ, м;  $Q_n$  — расход орошающей жидкости, м<sup>3</sup>/с;  $Q_r$  — расход воздуха, поступающего с частицами ЗВ в активную зону очистки, м<sup>3</sup>/с;  $v_k$  — средняя скорость капли в активной зоне очистки, м/с;  $r_k$  — средний медианный радиус капли, м;  $\text{Re}_k$  — число Рейнольдса для капли;  $\text{Sc}$  — число Шмидта.

Эффективность сближения частиц ЗВ с каплями за счет турбулентных сил определяют как отношение числа частиц ЗВ, сблизившихся с каплями, к общему числу частиц ЗВ в активной зоне очистки:

$$E_{\text{сбл. турб}} = 1 - \exp\left(-\frac{n_0^{\text{турб}}}{\Sigma n}\right), \quad (1)$$

где

$$\Sigma n = \frac{Q_n c_r}{V_a}. \quad (2)$$

где  $V_a$  — объем активной зоны орошения, м<sup>3</sup>.

Тогда, подставив (2) в (1), получаем:

$$E_{\text{сбл. турб}} = 1 - \exp\left(-\frac{1,25\left(\frac{\varepsilon}{v_r \mu_k}\right)^{\frac{1}{2}} h_\phi Q_n}{\pi \mu_k Q_n}\right),$$

где  $h_\phi$  — длина активной зоны факела орошения, м;  $v_r$  — скорость воздушного (газового) потока, м/с;  $\mu_k$  — кинематическая вязкость воздуха (газа), м<sup>2</sup>/с.

Эффективность перехода частицы ЗВ в область на границе раздела фаз за счет молекулярных сил определяем по формуле

$$E_{\text{п. мол}} = \frac{2}{3} \left( \frac{32B}{9\mu_{\text{в}} \nu_{\text{к}} d_{\text{к}} D_{\text{ч}}^2} \right)^{\frac{3}{2}},$$

где  $B \sim 10^{-26}$  — константа межмолекулярного взаимодействия с учетом эффекта электромагнитного запаздывания, Дж·м<sup>2</sup>;  $\mu_{\text{в}}$  — динамическая вязкость воздуха, Па·с;  $d_{\text{к}}$  — средний поверхностно-объемный диаметр капли, м.

Эффективность перехода молекул газа за счет адсорбции рассчитывают по формуле

$$E_{\text{п. адс}} = 1 - \exp \left( - \frac{nkT}{nkT + N_s \sqrt{2\pi mkT} e^{-\frac{\sigma}{kT}}} \right).$$

Эффективность перехода молекулы газа в область на границе раздела фаз за счет электростатических сил рассчитывают по формуле

$$E_{\text{п. эл}} = \sqrt{\frac{8q_{\text{к}}}{3\pi D_{\text{ч}} d_{\text{к}}^2 \mu_{\text{в}} \nu_{\text{к}}}},$$

где  $q_{\text{к}}$  — заряд капли, Кл.

Эффективность проникновения частицы ЗВ в объем жидкости за счет химического взаимодействия возможно определить по следующей зависимости:

$$E_{\text{пр. хим}} = 1 - \exp(-K_{\text{р}} \tau),$$

где  $K_{\text{р}}$  — константа скорости химической реакции взаимодействия частиц ЗВ и воды, с<sup>-1</sup>;  $\tau$  — время пребывания частицы ЗВ в объеме воды, с.

Эффективность оседания образовавшихся агрегатов (частиц ЗВ с каплями жидкости) из воздушного потока за счет сил гравитации находим по формуле

$$E_{\text{о}} = \frac{\sum D_{\text{а. ос. } i}^3 m_i}{\sum D_{\text{а}}^3 m_i},$$

где  $D_{\text{а. ос. } i}$  — средний медианный диаметр осевших агрегатов, м;  $D_{\text{а}}$  — средний медианный диаметр образовавшихся в активной зоне очистки агрегатов, м;  $m_i$  — содержание капель  $i$ -го размера, доли.

Минимальный диаметр агрегатов, м, успевших осесть на участке длиной  $l$  от форсунки до границы активной зоны очистки, рассчитывается по формуле

$$D_{\text{а. осг}} = \sqrt{\frac{18\nu_{\text{к}} h_{\text{ф}} \mu_{\text{в}}}{l \rho_{\text{ж}} g}},$$

где  $l$  — расстояние от форсунки, м;  $\rho_{\text{ж}}$  — плотность орошающей жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $h_{\text{ф}}$  — длина активной зоны орошения, м.

Средний поверхностно-объемный диаметр капли, м, определяется по формуле

$$d_k = \frac{3,24 \cdot 10^{-3}}{\sqrt[3]{10^{-5} H_n}} \sqrt{\frac{d_c}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}}.$$

Расход орошающей жидкости, м<sup>3</sup>/с, рассчитывается по уравнению неразрывности потока:

$$Q_n = \frac{\mu \pi d_c^2}{4} \sqrt{2 \cdot 10^{-3} g H_n},$$

где  $\mu$  — коэффициент расхода сопла оросителя, зависящий от типа распылителя и учитывающий особенности истечения жидкости ( $\mu = 0,02 \dots 1,00$ );  $d_c$  — диаметр сопла оросителя, м;  $H_n$  — давление орошающей жидкости перед оросителем, Па.

Число Sc представляет собой безразмерную величину, характеризующую относительные скорости диффузионного и конвективного переноса при постоянной  $Re_k$ . Оно определяется как

$$Sc = \frac{v_r}{D_r},$$
$$Re_k = \frac{d_k (v_k + v_r)}{\nu}.$$

Объем активной зоны факела орошения, м<sup>3</sup>, рассчитывается по его геометрическим параметрам:

$$V_a = \frac{\pi}{3} h_\phi^3 \sin^2 \frac{\alpha}{2}.$$

Массу капли, кг, определяют по ее среднему поверхностно-объемному диаметру:

$$m_k = \frac{\pi}{6} d_k^3 \rho_j,$$

Общее число капель в единице объема с учетом временной поправки на скорость капли, 1/м<sup>3</sup>·с, рассчитывают по формуле

$$n' = \frac{6 Q_n h_\phi}{\pi d_k^3 v_k V_\phi} B_1,$$

где  $B_1$  — коэффициент, учитывающий направление и величину скорости воздушного потока и равный:

- 1 — при малых скоростях воздушного потока;
- $\frac{v_{пт}}{1,5}$  — при больших скоростях и спутном движении;
- $\frac{1,5}{v_{пт}}$  — при больших скоростях и встречном движении.

Энергоемкостный показатель для процесса очистки орошением в общем виде определяется формулой

$$E^{\partial} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{\sum_{i=1}^n N_i}, \quad (3)$$

где  $\sum_{i=1}^n W_i$  — энергия, расходуемая на поглощение и удаление частиц ЗВ диспергированной жидкостью из воздушного потока (полезная энергия), Вт;  
 $\sum_{i=1}^n N_i$  — энергия, расходуемая на реализацию процесса очистки, Вт.

Энергоемкостный показатель позволяет оценить, насколько эффективно используется затрачиваемая энергия с точки зрения достижения цели процесса очистки воздушного потока от ЗВ. Детальный анализ действующих механизмов в процессе взаимодействия частиц ЗВ и жидкой фаз позволяет эффективно использовать каждый из этих механизмов, определить пути совершенствования процесса очистки орошением и получить возможность аналитического прогнозирования его рабочих параметров. Энергоемкостный показатель процесса очистки позволяет также оценить работу комплекса нескольких способов, применяемых в одной (ступенчатой) системе очистки.

Сближение частиц ЗВ с каплями диспергированной жидкости в потоке воздуха может приводить к их захвату. При этом на сближение частиц ЗВ с каплей оказывают влияние в основном диффузионные и турбулентные силы.

Рассмотрим энергетические параметры, непосредственно влияющие на захват и удаление частиц ЗВ из воздушного потока диспергированной жидкостью. Для того чтобы начался первый этап процесса очистки, необходимо сообщить капле жидкости кинетическую энергию, обеспечивающую возможность ее сближения с частицами ЗВ. Следовательно, в процессе орошения кинетическая энергия капель жидкости, в пограничный слой которых диффундировали частицы ЗВ, играет положительную роль с точки зрения механизма очистки воздуха. Параметр, Вт, учитывающий этот вид энергии, описывается уравнением

$$W_{\text{кин.н}} = 0,5m_{\text{к}}v_{\text{к}}^2n'V_{\text{а}}, \quad (4)$$

где  $m_{\text{к}}$  — масса капли, кг;  $v_{\text{к}}$  — скорость капли, м/с;  $n'$  — число капель, столкнувшихся с частицами ЗВ в единице объема в единицу времени,  $1/\text{м}^3\cdot\text{с}$ ;  $V_{\text{а}}$  — объем активной зоны орошения,  $\text{м}^3$ .

Первая стадия процесса коагуляции характеризуется преобладающим с точки зрения захвата частиц ЗВ влиянием адгезионных сил (включая аэродинамическое и молекулярное обтекание). Оценивать действие этих сил можно энергией адгезионного взаимодействия, которая вызывает притяжение, а следовательно, играет положительную роль в процессе очистки. Параметр, учитывающий энергию адгезионного взаимодействия, Вт, описывается уравнением:

$$W_A = \frac{0,6W_d F_A V_a}{\pi h_A^2 \tau}, \quad (5)$$

где  $W_d$  — энергия дисперсионного взаимодействия, Дж;  $h_A$  — среднее расстояние между частицей ЗВ и каплей в активной зоне орошения, м;  $F_A$  — суммарная площадь поверхности адгезионного взаимодействия капель жидкости с частицами ЗВ в единице объема,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  $\tau$  — время, в течение которого капля и частица ЗВ находятся в динамическом соприкосновении, с.

Обязательным условием завершения процесса гетерокоагуляции частицы ЗВ каплей жидкости является возникновение прочного контакта между ними и образование краевого угла смачивания. Количественно растекание жидкости по поверхности частицы ЗВ можно описать энергетическим параметром растекания:

$$W_p = \frac{\sigma_{ж-г}(1 - \cos \Theta) F_p V_a}{\tau'}, \quad (6)$$

где  $F_p$  — суммарная площадь поверхности растекания в единице объема,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  $\tau'$  — время смачивания, с.

Для того чтобы реализовать конкретный способ гидродинамической очистки воздуха низконапорным или высоконапорным орошением в определенных производственных условиях необходимы технические средства, позволяющие достичь соответствующих технологических параметров орошения (побудитель тяги вентиляционных потоков, насос и другие). При этом указанные технические средства требуют в работе определенных энергетических затрат:

энергетический параметр побудителя тяги вентиляционных потоков характеризует энергию воздушной струи, Вт, в сечении нагнетающего (всасывающего) патрубка побудителя тяги и описывается уравнением

$$N_{пт} = 9,8 H_{пт} Q_{пт}, \quad (7)$$

которое с учетом уравнения неразрывности потока воздуха и конструктивных характеристик элемента транспортирования (воздуховодов или газопроводов) приводится к виду

$$N_{пт} = 31,1 H_{пт}^{3/2} d_{пт}^2, \quad (8)$$

где  $H_{пт}$  — давление в сечении нагнетающего (всасывающего) патрубка побудителя тяги, Па;  $d_{пт}$  — эквивалентный диаметр нагнетающего (всасывающего) патрубка побудителя тяги, м;

энергетический параметр насосной установки характеризует энергию жидкостного потока, Вт, перед оросителем и описывается уравнением

$$N_n = 9,8 H_n Q_n, \quad (9)$$

которое также с учетом уравнения неразрывности жидкостного потока и конструктивных характеристик оросителя приводится к виду

$$N_n = 1,1 \cdot 10^{-4} \mu \pi d_c^2 \sqrt{g H_n^3}, \quad (10)$$

где  $\mu$  — коэффициент расхода сопла оросителя;  $d_c$  — диаметр сопла оросителя, м;  $H_n$  — давление жидкости перед оросителем, Па.

энергетический параметр электролизатора в случае использования различных классов жидкостных систем для орошения загазованного воздуха характеризует энергетическое состояние орошающей жидкости и описывается уравнением

$$N_3 = 6 \cdot 10^{-4} U_3 I_3 Q_ж, \quad (11)$$

где  $U_3$  — напряжение электрического тока в электролизаторе, В;  $I_3$  — сила тока в электролизаторе, А.

Подставив (4)—(11) в (3), получают

$$E^3 = \frac{\left( \frac{1,5kTC_r Q_B}{m_{\text{мол}}} + 0,5m_k v_k^2 n' V_a \right) E_{\text{сбл. диф}} + \left( \frac{\sigma_{ж-г} \pi d_k^2 n' V_a}{4} \right) E_{\text{сбл. диф}} E_{\text{п. алс}}}{9,8H_n Q_n + 31,1(H_{\text{пт}} - H_n)^{3/2} d_B^2 + 6 \cdot 10^{-4} U_a I_a Q_n + N_{\text{доп}}} + \frac{\left( \frac{C_r E_a K_p}{M_{\text{ГВС}}} \right) E_{\text{сбл. диф}} E_{\text{п. алс}} E_{\text{пр. хим}}}{9,8H_n Q_n + 31,1(H_{\text{пт}} - H_n)^{3/2} d_B^2 + 6 \cdot 10^{-4} U_a I_a Q_n + N_{\text{доп}}}, \quad (12)$$

где  $H_n$  — потери давления по длине элемента транспортирования (воздуховодов или газопроводов) от побудителя тяги до активной зоны орошения, Па;  $N_{\text{доп}}$  — энергетический параметр, учитывающий дополнительную подготовку орошающей жидкости (добавка химических соединений и т. п.) и дополнительную обработку воздушного (газового) потока (озонирование и т. п.), Вт.

Формула (12), естественно, не учитывает все возможные физические механизмы при взаимодействии частиц ЗВ и капель орошающей жидкости. Однако структура этой формулы, по нашему мнению, позволяет в процессе выявления новых механизмов и получения количественных оценок, их характеризующих, дополнять и уточнять энергоемкостный показатель  $E^3$ , получать все более полные и точные его оценки.

Параметрическая зависимость эффективности:

$$E_{\text{эф(о)}}^{(г,л)} = \left[ 1 - \left( 1 - 0,67 \left( \frac{3,6B}{\mu_v V_k d_k D_c^2} \right)^{1,5} \right) \left( 1 - 0,032q \sqrt{\frac{d_k \rho_{ж}}{Q_n D_{\text{п}} \mu_v V_k}} \right) \right] \times \left[ \left( 1 - \frac{\rho_k D_c^2 v_k}{18\mu_v D_k \left( \frac{\rho_k D_c^2 v_k}{18\mu_v d_k} + 10^{n_1 A_d} \right)} \right) \frac{\cos \Theta}{\cos \Theta + 10^{-n_1}} \right],$$

где  $B$  — константа межмолекулярного взаимодействия, Дж·м<sup>2</sup>;  $q$  — электрозаряженность жидкостного аэрозоля, Кл/кг;  $n_1$  — коэффициент, характеризующий скоростной режим распространения жидкостного аэрозоля в активной зоне очистки;  $A_d$  — коэффициент полноты перекрытия поперечного сечения активной зоны очистки факелом диспергированной жидкости.

Параметрическая зависимость энергоемкостного показателя:

$$E_{(o)}^{э(рд)} = \frac{E_{эф(по)}^{(рд)} v'_k h_A B_1}{9,8 H_n + \frac{2800 (H_{пт} - H_n)^{1,5} d_a^2}{\mu \pi d_c^2 \sqrt{H_n g}}} \times \left( 0,5 \rho_{ж} + \frac{10^{-26}}{d_c g \mu^2 \mu_b} + \frac{6 \sigma_{жг} (1 - \cos \Theta)}{\tau_{см} (v'_k)^2} \right),$$

где  $B_1$  — коэффициент, учитывающий направление и величину скорости потока ЗВ в активной зоне процесса очистки;  $H_n$  — давление жидкости, создаваемое насосом непосредственно перед оросителем, Па;  $H_{пт}$  — полное давление воздуха во всасывающем (нагнетающем) сечении побудителя тяги (вентилятора), Па;  $H_n$  — потери давления в сети элемента транспортирования (воздуховодов или газопроводов) от всасывающего (нагнетающего) сечения побудителя тяги (вентилятора) до начальной границы активной зоны процесса очистки, Па;  $d_a$  — эквивалентный диаметр поперечного сечения активной зоны процесса очистки, м;  $\tau_{см}$  — время смачивания частицы ЗВ каплей диспергированной жидкости, с;  $d_c$  — диаметр соплового отверстия оросителя, м;  $\mu$  — коэффициент расхода соплового отверстия оросителя;  $h_A$  — длина активной зоны факела орошения, м.

Представленный пример математического описания положен нами в основу разработки методики выбора максимально экологически эффективных и энергетически экономичных средств очистки отходящих газов от токсичных компонентов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беспалов В. И. Физико-энергетическая концепция описания процессов и системный подход к выбору высокоэффективных и экономичных инженерных комплексов защиты воздушной среды от выбросов загрязняющих веществ // Известия СКНЦ ВШ. Естественные науки. Ростов н/Д, 1995. С. 37—47.
2. Беспалов В. И. Физико-энергетическая концепция описания процессов и проектирования инженерных комплексов защиты воздушной среды // БЖД. Охрана труда и окружающей среды. Ростов н/Д: РГАСМ, 1997. С. 65—70.
3. Гурова О. С., Мещеряков С. В. Разработка комплексного подхода к энергетической оценке загрязнения окружающей среды // Международная науч.-практич. конф. «Строительство-2004». РГСУ, 2004.
4. Беспалов В. И., Мещеряков С. В., Гурова О. С. Процессы и аппараты защиты окружающей среды : учебное пособие по спец. 330200 «Инженерная защита окружающей среды». Ростов н/Д : РГСУ, 2006. 119 с.
5. Беспалов В. И., Дanelьянц Д. С., Мишнер Й. Теория и практика обеспыливания воздуха. Ростов н/Д: Изд-во «МП Книга», 2000. 190 с.
6. Development of physical and energy concept for assessment and selection of technologies for treatment of emissions from urban environment objects / O. S. Gurova, N. S. Samarskaya, E. P. Lysova, A. N. Mischenko // Biosciences, Biotechnology Research Asia. 2014. Vol. 11. № 3. 6 p.
7. Беспалов В. И., Мещеряков С. В., Гурова О. С. Оценка процессов и расчет аппаратов защиты окружающей среды: учебное пособие. Ростов н/Д : ООО «Мини Тайп», 2007. 192 с.
8. Беспалов В. И., Ефременко Г. Л., Страхова Н. А. Анализ процесса обеспыливания воздуха пневмогидроорошением // Междунар. науч.-практич. конф. «Строительство-2003» (9—11 апреля 2003 г.). Ростов н/Д: изд-во РГСУ. С. 10—12.
9. Гурова О. С. Комплексная система гидродинамического метода очистки воздуха рабочих зон предприятий строительной индустрии // Материалы 5-й Всерос. науч.-практич. конф. «Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности». Санкт-Петербург, 2000.

10. *Гурова О. С.* Совершенствование методов снижения загрязнения воздушной среды // Тезисы Международной науч.-практич. конф. «Строительство-2001». Ростов н/Д: РГСУ, 2001.

11. *Беспалов В. И., Данельяни Д. С.* Оптимизация параметров высоконапорного орошения // Науч.-практич. конф. «Здоровье города — здоровье человека». Ростов н/Д: Экспертное бюро-Т, 2001.

12. *Беспалов В. И., Данельяни Д. С.* Оптимизация параметров гидрообеспыливания высоконапорным орошением // Междунар. школа-семинар «Промышленная экология». Ростов н/Д: РГСУ, 2000.

13. *Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т.* Свойства газов и жидкостей: справочное пособие / пер. с англ. под ред. Б. И. Соколова. Л.: Химия, 1982. 592 с.

14. *Гурова О. С., Мецержаков С. В.* Методика рационального использования энергетического потенциала технологических процессов для обеспечения экологической и производственной безопасности // Материалы Международной школы-семинара «Промышленная экология». Ростов н/Д, 2001.

© *Беспалов В. И., Бурлаченко О. В., Гурова О. С., Парамонова О. Н., Лысова Е. П., 2016*

*Поступила в редакцию  
в декабре 2015 г.*

*Ссылка для цитирования:*

Математическое описание результирующих параметров процесса очистки токсичных компонентов отходящих и выхлопных газов объектов городской среды / В. И. Беспалов, О. В. Бурлаченко, О. С. Гурова, О. Н. Парамонова, Е. П. Лысова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 211—224.

*Об авторах:*

**Беспалов Вадим Игоревич** — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой инженерной защиты окружающей среды, Ростовский государственный строительный университет. Российская Федерация, 344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162, [izos3402-rgsu@mail.ru](mailto:izos3402-rgsu@mail.ru)

**Бурлаченко Олег Васильевич** — д-р техн. наук, проф., проректор по учебно-воспитательной работе, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [oburlachenko@yandex.ru](mailto:oburlachenko@yandex.ru)

**Гурова Оксана Сергеевна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры инженерной защиты окружающей среды, Ростовский государственный строительный университет. Российская Федерация, 344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162, [izos3402-rgsu@mail.ru](mailto:izos3402-rgsu@mail.ru)

**Парамонова Оксана Николаевна** — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры инженерной защиты окружающей среды, Ростовский государственный строительный университет. Российская Федерация, 344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162, [izos3402-rgsu@mail.ru](mailto:izos3402-rgsu@mail.ru)

**Лысова Екатерина Петровна** — старший преподаватель кафедры инженерной защиты окружающей среды, Ростовский государственный строительный университет. Российская Федерация, 344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162, [izos3402-rgsu@mail.ru](mailto:izos3402-rgsu@mail.ru)

***V. I. Bespalov, O. V. Burlachenko, O. S. Gurova, O. N. Paramonova, E. P. Lysova***

#### **MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE RESULTANT PARAMETERS OF PURIFICATION PROCESS OF TOXIC COMPONENTS OF STACK AND EXHAUST GASES OF OBJECTS OF THE URBAN ENVIRONMENT**

The hydrodynamic method of stack gases purification from toxic polluting substances as consecutive realization of four stages of the interaction process of the "gas — liquid" system both between themselves, and with the environment on the basis of study of physical features of this process is considered in the article. The mathematical description of purification method based on the criteria of ecological efficiency and energy consumption index is offered.

**Key words:** hydrodynamic method of stack gases purification, ecological efficiency, energy consumption index, stack and exhaust gases of objects of municipal facilities.

REFERENCES

1. Bespalov V. I. [Physical and energy concept of description of processes and system approach to the choice of high efficiency and economical engineering complexes of air protection against pollutant emissions]. *Izvestiya SKNTs VSh. Estestvennyye nauki* [News of SFEDU. Natural Sciences]. Rostov-on-Don, 1995. Pp. 37—47.
2. Bespalov V. I. [Physical and energy concept of description of processes and design of engineering complexes of air protection]. *BZhD. Okhrana truda i okruzhayushchei sredy* [BZhD. Labour and environmental safety]. Rostov-on-Don, DONSTU Publ., 1997. Pp. 65—70.
3. Gurova O. S., Meshcheryakov S. V. [Development of a comprehensive approach to energy estimation of environmental pollution]. *Mezhdunarodnaya nauch.-praktich. konf. «Stroitel'stvo-2004»* [International Scientific and Practical Conf. "Construction-2004"]. RGSU, 2004.
4. Bespalov V. I., Meshcheryakov S. V., Gurova O. S. *Protsepy i apparaty zashchity okruzhayushchei sredy : uchebnoe posobie po spets. 330200 «Inzhenernaya zashchita okruzhayushchei sredy»* [Processes and devices of environmental protection. Textbook on speciality 330200 "Engineering environmental protection"]. Rostov-on-Don: RGSU Publ., 2006. 119 c.
5. Bespalov V. I., Danel'yants D. S., Mishner I. *Teoriya i praktika obespylivaniya vozdukh* [Theory and practice of air dust control]. Rostov-on-Don, "MP Kniga" Publishing House, 2000. 190 p.
6. Gurova O. S., Samarskaya N. S., Lysova E. P., Mischenko A. N. Development of physical and energy concept for assessment and selection of technologies for treatment of emissions from urban environment objects. *Biosciences, Biotechnology Research Asia*, 2014, 11(3), 6 p.
7. Bespalov V. I., Meshcheryakov S. V., Gurova O. S. *Otsenka protsessov i raschet apparatov zashchity okruzhayushchei sredy: uchebnoe posobie* [Assessment of processes and design of devices of environmental protection. Textbook]. Rostov-on-Don, LLC "Mini Type", 2007. 192 p.
8. Bespalov V. I., Efremenko G. L., Strakhova N. A. [Analysis of air dust control by pneumo-hydroirrigation]. *Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. «Stroitel'stvo-2003» (9—11 aprelya 2003 g.)* [Int. Sci.-Pract. Conf. "Construction-2003" (April 9—11, 2003)]. Rostov-on-Don, RGSU Publ. Pp. 10—12.
9. Gurova O. S. [Complex system of a hydrodynamic method of air purification in working space at enterprises of the construction industry]. *Materialy 5-i Vseros. nauch.-praktich. konf. «Novoe v ekologii i bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti»* [Proc. of 5<sup>th</sup> All-Russian Sc.-Pr. Conference "New things in ecology and health and safety"]. Saint Petersburg, 2000.
10. Gurova O. S. [Improvement of methods of air pollution abatement]. *Tezisy Mezhdunarodnoi nauch.-praktich. konf. «Stroitel'stvo-2001»* [Proc. Int. Sci.-Pract. Conf. "Construction-2001"]. Rostov-on-Don, RGSU Publ., 2001.
11. Bespalov V. I., Danel'yants D. S. [Optimization of high-pressure irrigation]. *Nauch.-praktich. konf. «Zdorov'e goroda — zdorov'e cheloveka»* [Sc.-Pract. Conf. "City health — human health"]. Rostov-on-Don, Ekspertnoe Byuro-T Pul., 2001.
12. Bespalov V. I., Danel'yants D. S. [Optimization of parameters of hydro dust control by high-pressure irrigation]. *Mezhdunar. shkola-seminar «Promyshlennaya ekologiya»* [Intern. School-Workshop "Industrial ecology"]. Rostov-on-Don: RGSU, 2000.
13. Rid R., Prausnits Dzh., Shervud T. *Svoistva gazov i zhidkosti: spravochnoe posobie* [Properties of gases and liquids. Reference book]. Leningrad, Khimiya Publ., 1982. 592 p.
14. Gurova O. S., Meshcheryakov S. V. [Methodology of rational use of energy potential of technological processes for assurance of environmental and production safety]. *Materialy Mezhdunarodnoi shkoly-seminara «Promyshlennaya ekologiya»* [Proc. the Int. School-Workshop "Industrial ecology"]. Rostov-on-Don, 2001.

For citation:

Bespalov V. I., Burlachenko O. V., Gurova O. S., Paramonova O. N., Lysova E. P. [Mathematical description of the resultant parameters of purification process of toxic components of stack and exhaust gases of objects of the urban environment]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 211—224.

About authors:

**Bespalov Vadim Igorevich** — Doctor of Engineering Science, Professor, Head of Engineering Environmental Protection Department, Rostov State University of Civil Engineering. 162, Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don, 344022, Russian Federation, izos3402-rgsu@mail.ru

**Burlachenko Oleg Vasil'evich** — Doctor of Engineering Science, Professor, Vice-Rector for Studies and Educational Work, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, oburlachenko@yandex.ru

**Gurova Oksana Sergeevna** — Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Engineering Environmental Protection Department, Rostov State University of Civil Engineering. 162, Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don, 344022, Russian Federation, izos3402-rgsu@mail.ru

**Paramonova Oksana Nikolaevna** — Candidate of Engineering Science, Senior Lecturer of Engineering Environmental Protection Department, Rostov State University of Civil Engineering. 162, Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don, 344022, Russian Federation, izos3402-rgsu@mail.ru

**Lysova Ekaterina Petrovna** — Senior Lecturer of Engineering Environmental Protection Department, Rostov State University of Civil Engineering. 162, Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don, 344022, Russian Federation, izos3402-rgsu@mail.ru

УДК 502.3:504.5614.715

**Ю. С. Михайловская, Н. В. Мензелинцева, Н. Ю. Карапузова, В. А. Лактюшин,  
С. А. Богомолов**

*Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

## **АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ПЫЛИ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ МЕГАПОЛИСА**

Анализируются среднегодовая динамика выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников загрязнения и содержание твердых частиц  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  в атмосферном воздухе г. Санкт-Петербурга.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** ПДК, пыль строительных производств, дисперсный анализ.

В настоящее время в качестве критерия качества атмосферного воздуха в нашей стране используются санитарно-гигиенические нормы — предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в воздухе населенных мест. Введенные в действие гигиенические нормативы ГН 2.1.6.2604—10 с 21 июня 2010 г. устанавливают предельно допустимую концентрацию (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест в  $mg/m^3$  для взвешенных веществ частиц размером менее 10 мкм ( $PM_{10}$ ) и для частиц размером менее 2,5 мкм ( $PM_{2,5}$ ) [1, 2].

В США и Европейском союзе (ЕС) такое нормирование существует уже многие годы и сопровождается значительным количеством наблюдений, исследований, методических разработок. Большое внимание гигиеническому значению мелкодисперсных частиц уделяет Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) [3—10].

Мелкодисперсные частицы аэродинамическим диаметром менее 10 мкм ( $PM_{10}$ ) и 2,5 мкм ( $PM_{2,5}$ ) длительное время находятся в воздухе, переносятся на большие расстояния и легко преодолевают защитные барьеры человеческого организма, проникая глубоко в легкие, что определяет необходимость контроля содержания именно этих частиц в атмосферном воздухе городов.

Уровень загрязнения воздуха в крупном мегаполисе определяется выбросами загрязняющих веществ от стационарных и передвижных источников. Так, суммарный выброс загрязняющих веществ в атмосферу г. Санкт-Петербурга в год в среднем составляет 550 тыс. т [11]. Динамика выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников и автотранспорта представлена в табл. 1.

Состояние загрязнения воздушного бассейна крупного мегаполиса зависит не только от количества выбросов и их химического состава, но и от климатических условий, определяющих перенос, рассеивание и превращение выбрасываемых веществ.

В целом климатические условия Санкт-Петербурга, влияющие на уровень загрязнения воздуха, несколько более благоприятны, чем в среднем по городам России: морской климат, градостроительная планировка создают благоприятные условия для рассеивания. Согласно розе ветров за год для

Санкт-Петербурга город чаще проветривается ветрами юго-западных (21 %) и западных (23 %) направлений. В табл. 2. приведены данные по климатическим характеристикам.

Т а б л и ц а 1

*Динамика выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников в атмосферу Санкт-Петербурга за 5 лет*

Годы	Стационарные		Подвижные	
	Всего	Твердые частицы	Всего	Твердые частицы
2011	440,7	2,6	374,8	1,0
2012	488,2	2,6	419,3	0,7
2013	536,2	2,7	464,3	0,8
2014	544,0	2,5	468,2	0,8
2015	552,4	2,7	472,4	0,9

Т а б л и ц а 2

*Характеристика климатических условий*

Среднегодовые данные	Многолетние	2011	2012	2013	2015
Осадки, число дней	192	242	234	234	244
Скорость ветра, м/с	2,3	2,1	2,1	2,1	2,2
Повторяемость приземных инверсий, %	22,5	22,4	24,7	40,7	28,7
Повторяемость ветров, %	7,6	6,8	8,0	8,0	7,5
Повторяемость ветров со скоростью 0...1, %	32,7	32,9	36,1	36,1	36,1
Повторяемость приподнятых инверсий, %	39,0	59,2	43,8	43,8	43,8
Повторяемость туманов, %	0,6	0,3	0,5	0,5	0,5

Среднегодовая концентрация взвешенных частиц в атмосферном воздухе Санкт-Петербурга изменяется в пределах 0,2...0,8 ПДК<sub>с.с.</sub>. В течении года среднемесячные концентрации в среднем меняются от 0,5 до 1,2 ПДК. На рис. 1. показан годовой ход среднемесячной ПДК за 2012 и 2013 гг. [1].

В весенние месяцы запыленность увеличивается в связи со сходом снежного покрова и высыханием почв. Значения максимальных концентраций во всех районах города изменяется в среднем от 1,2 до 2,4 ПДК, повторяемость превышения концентрациями ПДК колеблется в среднем от 0,2 до 2,5 %.

Загрязненность в целом по городу наиболее часто оценивается как повышенная в мае, июне, августе и октябре.

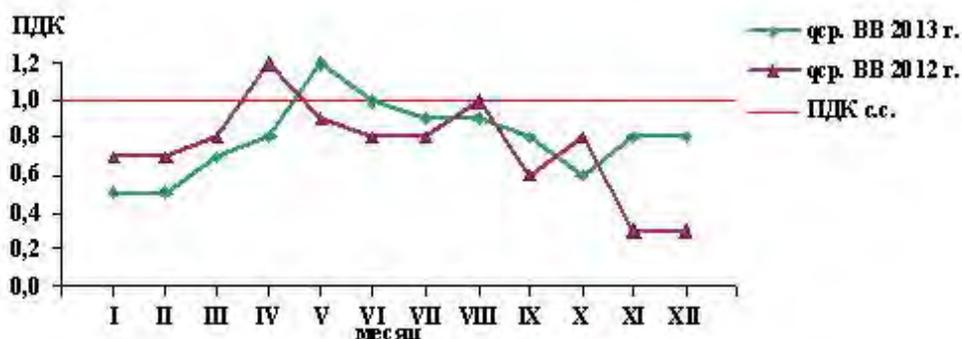


Рис. 1. Годовой ход среднемесячной ПДК

Практические исследования показали, что максимальную опасность для организма человека определяют частицы размером 2,5...10 мкм. Мелкодисперсные твердые частицы  $PM_{10}$  могут попадать в атмосферный воздух при непосредственном выбросе в атмосферу от предприятий строительной отрасли и промышленных производств, как от источников выделения. Анализ вклада стационарных источников в загрязнение показал, что значительная часть загрязнения приходится на предприятия по производству асфальтобетона (АБЗ), заводов ЖБИ и керамзита [1, 2].

Проведен анализ дисперсного состава пыли выбросов предприятий, вносящих значительный вклад в загрязнение. На рис. 2—6 представлены интегральные кривые распределения массы по диаметрам частиц выбросов завода ЖБИ, завода по производству керамзита и АБЗ.

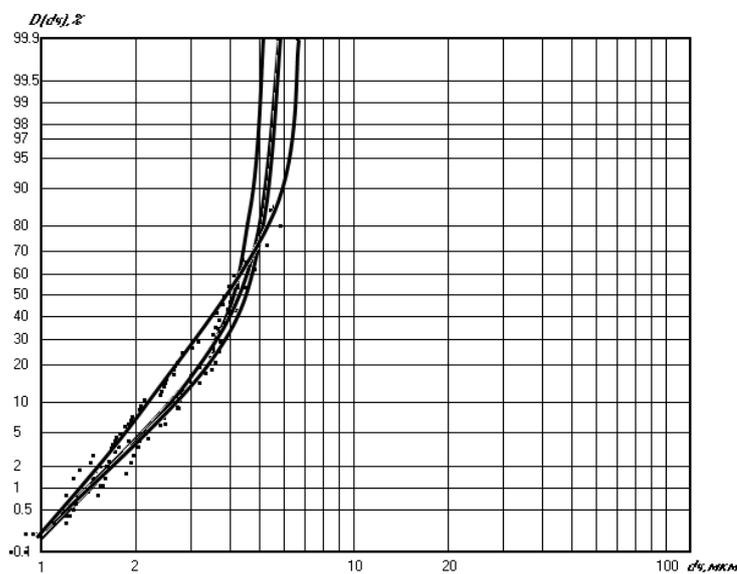


Рис. 2. Интегральные кривые распределения массы по диаметрам частиц  $D(\delta_q)$  в вероятностно-логарифмической координатной сетке для пыли, отобранной в воздухе цеха бетонно-смесительного узла завода ЖБИ

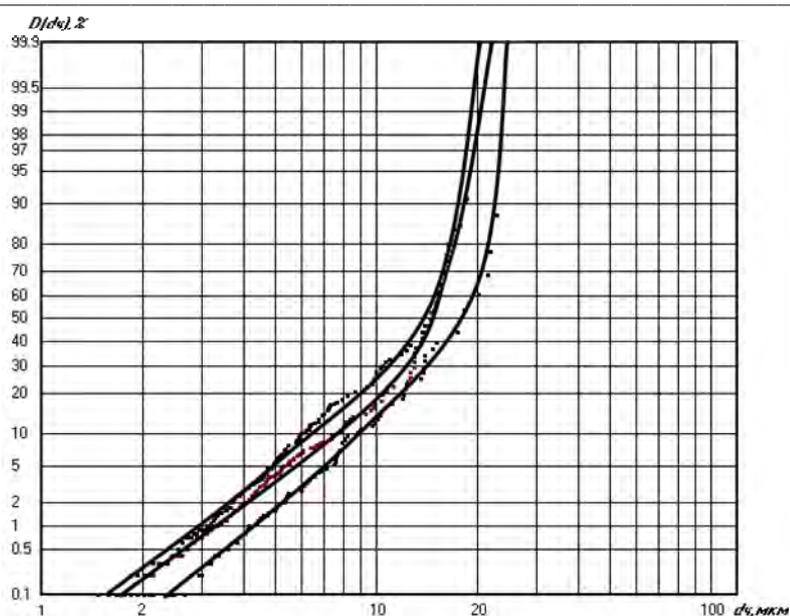


Рис. 3. Интегральные кривые распределения массы по диаметрам частиц  $D(\delta_{\text{ч}})$  в вероятностно-логарифмической координатной сетке для пыли, отобранной в воздухе цеха бетонно-смесительного узла. Блок № 3 завода ЖБИ

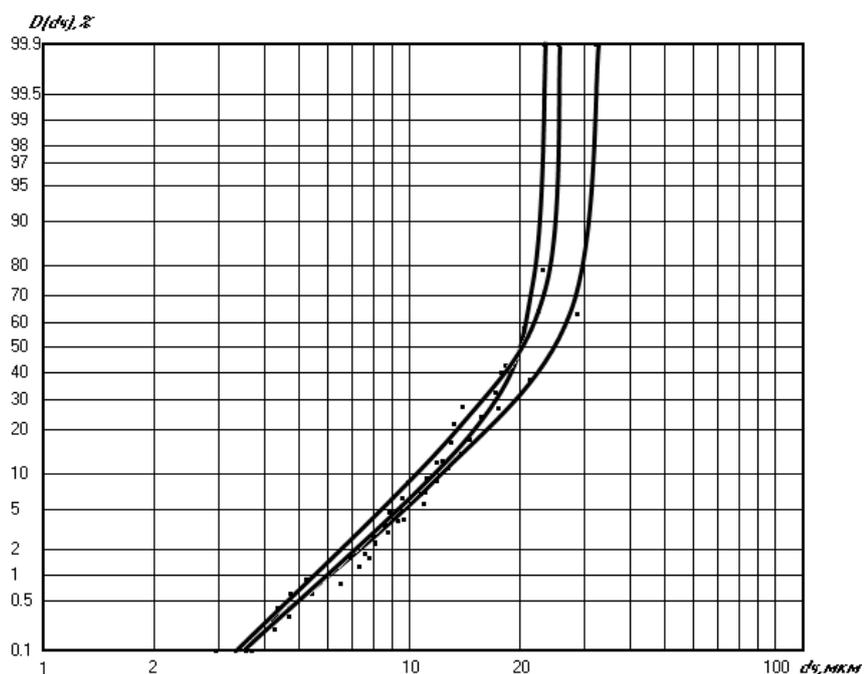


Рис. 4. Интегральные кривые распределения массы по диаметрам частиц  $D(\delta_{\text{ч}})$  в вероятностно-логарифмической координатной сетке для пыли, отобранной в атмосфере цеха на участке формовки готовых изделий

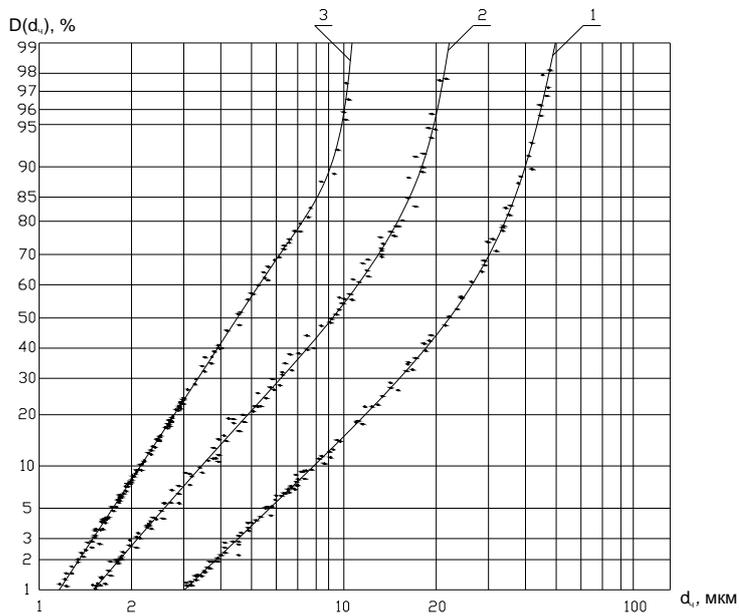


Рис. 5. Интегральные кривые распределения массы по диаметрам частиц  $D(\delta_q)$  в вероятностно-логарифмической координатной сетке для пыли асфальтобетонного производства, отобранной: 1 — в зоне сушильного барабана; 2 — в зоне складов инертных материалов; 3 — в зоне обслуживания дробильного агрегата

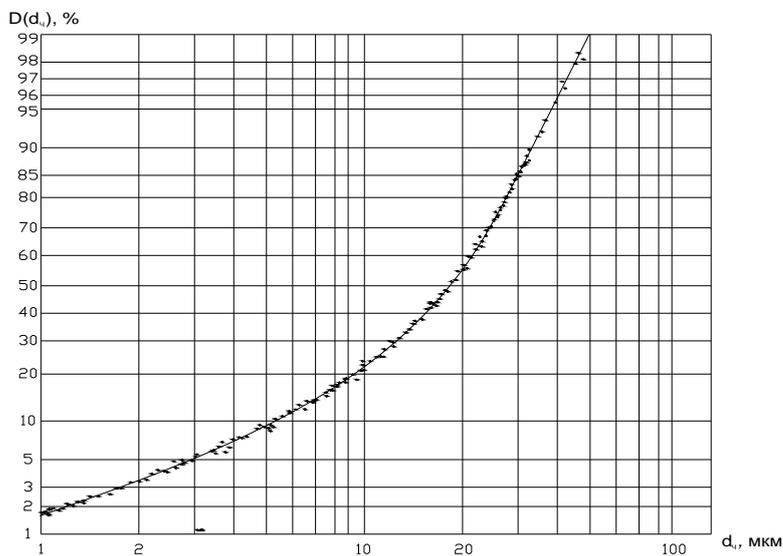


Рис. 6. Интегральные кривые распределения массы частиц по диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке для пыли, отобранной в системе аспирации вращающейся печи обжига керамзита

Анализ полученных зависимостей показал, что дисперсный состав производственной пыли полидисперсный и представлен мелкодисперсными (респирабельными) и среднелдисперсными фракциями с размерами до 20 мкм, которые при вдохе проникают до легочных альвеол и там задерживаются. Среднее содержание мелкодисперсной пыли в выбросах исследуемых производств представлен в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

*Среднее содержание мелкодисперсной пыли*

Наименование производства	$D(\delta_{\text{ч}}) \text{PM}_{10}, \%$	$D(\delta_{\text{ч}}) \text{PM}_{2,5}, \%$
ЖБИ	13	4
Асфальтобетонное	55	7
Керамзита	23	2,5

Проведен анализ содержания частиц  $\text{PM}_{2,5}$  и  $\text{PM}_{10}$  в атмосферном воздухе мегаполиса.

Определение концентрации частиц  $\text{PM}_{2,5}$  и  $\text{PM}_{10}$  технологически сложнее определения концентрации взвешенных веществ в целом, так как из общей массы твердых частиц, находящихся в атмосферном воздухе, нужно выделить именно фракции с содержанием пыли с размерами до 2,5 микрон и до 10 микрон [11, 12].

Общее количество обрабатываемых данных должно быть таким, чтобы обеспечить получение однородной выборки из результатов. Установление однородности ряда предполагает проведение статистического анализа в следующей последовательности [13]:

а) определяется среднеарифметическое значение концентрации  $C$  ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) по формуле

$$C_{\text{cp}} = \frac{C_1 + C_2 + \dots + C_n}{n}, \quad (1)$$

где  $C_1, C_2 \dots C_n$  — результаты определений разовых значений концентраций ЗВ;  $n$  — количество определений (измерений);

б) определяется среднее квадратичное отклонение результатов определений (измерений)

$$\sigma = \sqrt{\frac{(C_{\text{cp}} - C_1)^2 + (C_{\text{cp}} - C_2)^2 + \dots + (C_{\text{cp}} - C_n)^2}{n - 1}} \quad (2)$$

и его оценка

$$\mu_{\bar{C}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \quad (3)$$

в) находится доверительный интервал

$$\varepsilon = \mu_{\bar{C}} t, \quad (4)$$

где  $t$  — коэффициент Стьюдента, величина которого определяется при доверительной вероятности  $P = 0,95$  в зависимости от числа степеней свободы  $k = n - 1$ ;

г) из выборки исключаются результаты определений, для которых выполняется неравенство

$$|\bar{C} - C_1| > \varepsilon. \quad (5)$$

Если исключению подлежит менее 30 % результатов определений (измерений), то за среднее значение концентрации принимается величина  $\bar{C}$ .

В противном случае, после исключения непригодных результатов из выборки, для оставшихся членов ряда процедура проверки на однородность повторяется.

Если после исключения непригодных результатов в ряду остается менее трех членов, необходимо отобрать дополнительные пробы (провести дополнительные измерения).

Значение максимально разовой концентрации принимается равным

$$C_{\max} = \bar{C} + \varepsilon. \quad (6)$$

Путем статистической обработки средних (за месяц) концентраций на постах АСМ г. Санкт-Петербурга были получены среднегодовые значения концентраций  $PM_{10}$ , которые представлены в табл. 4 и на рис. 7, 8.

Т а б л и ц а 4

*Среднегодовые значения концентрации частиц  $PM_{10}$  по постам*

Номер АСМ	2010	2011	2012	2013	2014
1	0,04	—	—	—	—
3	0,74	0,67	0,55	0,68	0,67
4	0,75	0,69	0,65	0,67	0,68
1	2	3	4	5	6
5	0,98	0,57	0,51	0,55	0,53
6	0,72	0,52	—	0,54	0,57
8	0,75	0,67	0,65	0,68	0,72
9	0,77	0,65	0,49	0,57	0,48
17	0,72	0,42	0,36	0,41	0,45
18	0,76	0,56	0,60	0,64	0,67
19	0,72	0,73	0,65	0,67	0,67
20	0,76	0,76	0,81	0,82	0,80

На рис. 8 представлено распределение концентраций частиц  $PM_{10}$  для поста № 20, где наблюдались пиковые значения, по годам наблюдения.

Путем статистической обработки средних (за месяц) концентраций на постах АСМ г. С-Петербурга были получены среднегодовые значения концентраций  $PM_{2,5}$  за 2010—2012 гг. Значения представлены в табл. 5 и на рис. 9.

Распределение средних концентраций  $PM_{2,5}$  за 2010—2012 гг. показано на рис. 10.

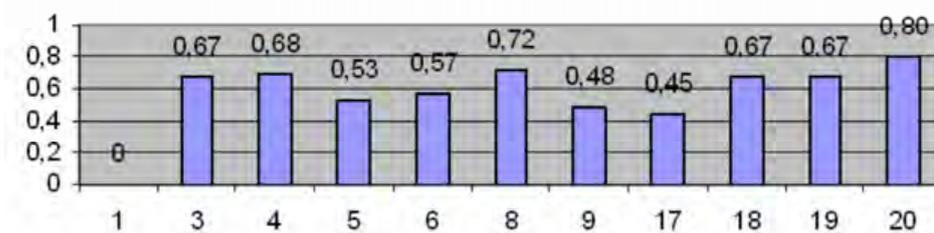


Рис. 7. Распределение содержания частиц PM<sub>10</sub> в воздухе по постам в 2014 г.

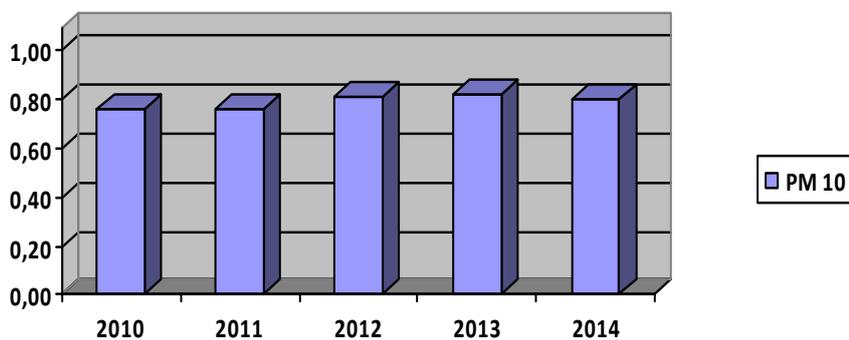


Рис. 8. Пост АСМ № 20. Распределение концентрации частиц PM<sub>10</sub> по годам

Таблица 5

Среднегодовые значения концентрации частиц PM<sub>2,5</sub> по постам

Номер АСМ	2010	2011	2012	2013	2014
1	0,05	0,55	0,67	0,68	0,69
7	0,48	1,06	—	0,87	0,93
16	—	0,64	—	0,67	0,65

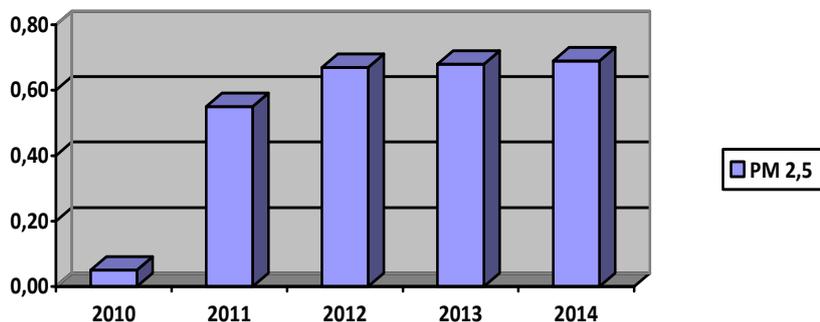


Рис. 9. Пост АСМ № 1. Распределение концентрации частиц PM<sub>2,5</sub> по годам

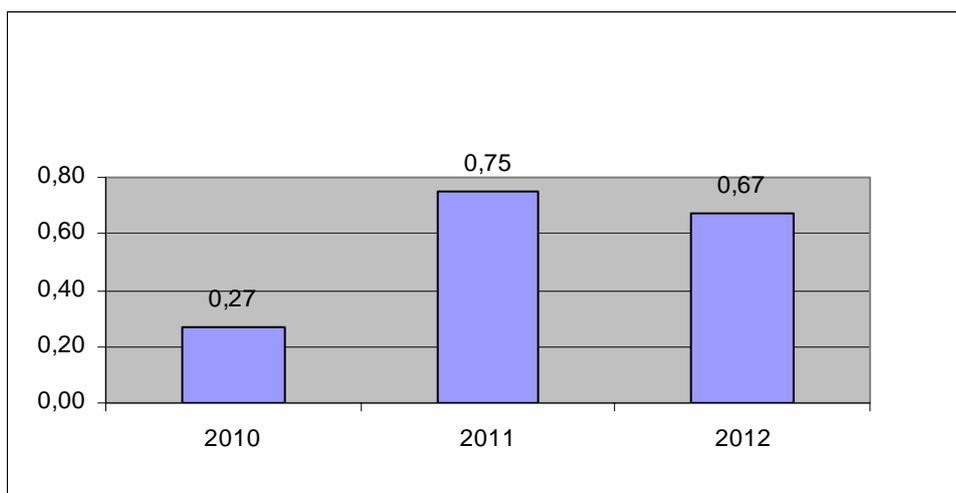


Рис. 10. Распределение средних концентраций частиц  $PM_{2,5}$  за 2010—2012 гг.

На рис. 11 приведено распределение средних концентраций частиц  $PM_{10}$  по годам наблюдения, из которого видно, что значение  $C_m/PДК_{с.г.}$  наиболее велико в 2010 г. (0,70), а в течение 2011 и 2012 гг. снижается (0,62 и 0,59 соответственно).

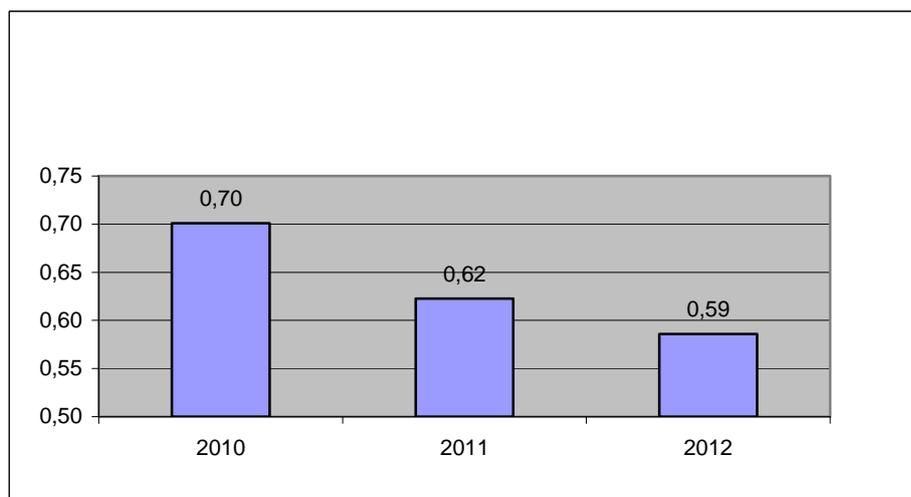


Рис. 11. Распределение средних концентраций частиц  $PM_{10}$  за 2010—2012 гг.

Для анализа значений  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  по месяцам и сезонам работа проводилась с исходными средними и максимальными (за месяц) концентрациями, не подвергавшимися статистической обработке. Они сопоставлялись с значением  $ПДК_{с.с}$  (рис. 12, 13).

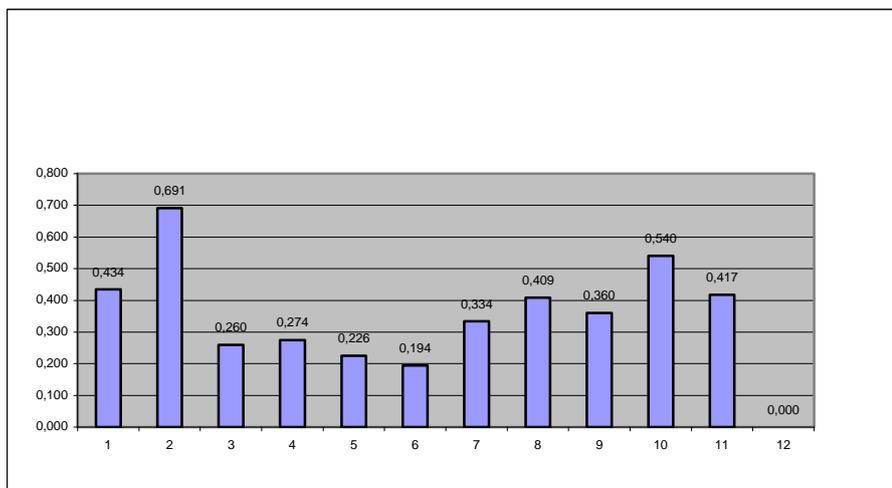


Рис. 12. Пост АСМ № 1 Распределение  $C_m/PДК_{ср.с}$  для частиц  $PM_{2,5}$  по месяцам 2012 г.

В целом по графику видно, что в осенне-зимние месяцы содержание  $PM_{2,5}$  в атмосферном воздухе на посту АСМ № 1 наибольшее, а в весенне-летние месяцы — наименьшее.

На рис. 13 значение концентрации  $PM_{10}$  максимально в зимние и летние месяцы, а минимально — весной и осенью.

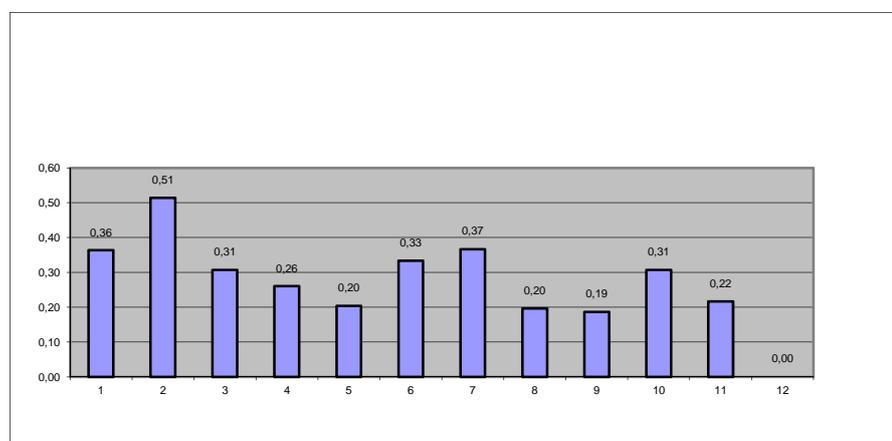


Рис. 13. Пост АСМ № 3 Распределение  $C_m/PДК_{ср.с}$  для частиц  $PM_{10}$  по месяцам 2011 г.

Проведенный анализ показал, что среднегодовые концентрации мелко-дисперсных частиц  $PM_{10}$  в центральной части города составляют 0,4...0,6  $PДК_{с.г.}$ , в периферийных районах города — 0,4...0,5  $PДК_{с.г.}$ . Максимальные разовые концентрации  $PM_{10}$  в центральных частях города составили — 0,6...2,4  $PДК_{м.р.}$ , в периферийных районах — 0,9...2,3  $PДК$ , повторяемость случаев от 0 до 0,1 %. Среднегодовая концентрация в центральной части города в целом составляет 0,5  $PДК_{с.г.}$ , в периферийных 0,4  $PДК_{с.г.}$ .

Среднегодовые концентрации мелкодисперсных частиц  $PM_{2,5}$  в местах расположения АСМ составляют 0,5...0,9 ПДК<sub>с.г.</sub>, Максимальные разовые концентрации составили 2,0...3,6 ПДК<sub>м.р.</sub>, повторяемость случаев — 0...0,1 %, в районах 0,9...2,3 ПДК. Среднегодовая концентрация в целом в центральной части города составляет 0,7 ПДК<sub>с.с.</sub>, в периферийных районах города — 0,5 ПДК<sub>с.с.</sub>.

#### **Выводы:**

1. Среднегодовая концентрация взвешенных частиц в атмосферном воздухе Санкт-Петербурга изменяется в пределах 0,2...0,8 ПДК<sub>с.с.</sub>. В течение года среднемесячные концентрации в среднем меняются от 0,5 до 1,2 ПДК. Загрязненность в целом по городу наиболее часто оценивается как повышенная в мае, июне, августе и октябре.

2. Анализ вклада стационарных источников в загрязнение показал, что значительная часть загрязнения приходится на предприятия по производству асфальтобетона, заводов ЖБИ и керамзита. Исследование дисперсного состава пыли, содержащейся в выбросах этих предприятий, показал, что значительную часть составляют мелкодисперсные частицы, обуславливающие особенности распространения в зоне жилой застройки.

3. Среднегодовые концентрации мелкодисперсных частиц  $PM_{10}$  в центральной части города составляют 0,4...0,6 ПДК<sub>с.г.</sub>, в периферийных районах города — 0,4...0,5 ПДК<sub>с.г.</sub>. Максимальные разовые концентрации  $PM_{10}$  в центральных частях города составляют 0,6...2,4 ПДК<sub>м.р.</sub> в периферийных частях. Среднегодовые концентрации мелкодисперсных частиц  $PM_{2,5}$  в местах расположения АСМ составляют 0,5...0,9 ПДК<sub>с.г.</sub>.

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2014 году / под ред. И. А. Сербицкого. СПб. : ООО «Дитон», 2015. 180 с.
2. Азаров В. Н., Мензелинцева Н. В., Карапузова Н. Ю. Об оценке доли частиц  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  в выбросах предприятий строительной отрасли // Вестник отделения строительных наук РААСН. 2012. Т. 2. С. 6—12.
3. WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide Global update 2005. Summary of risk assessment. (WHO/SDE/PHE/OEH/06.02) WHO, 2006, 22 p.
4. National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter; Final Rule. Federal Register. Vol. 71, No. 200, October 17, 2006 / Rules and Regulations ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY.
5.  $PM_{10}$ -Emissionsfaktoren von Abriebspartikeln des Strassenverkehrs (APART). Forschungsauftrag ASTRA 2005/007 auf Antrag des Bundesamtes Für Strassen (ASTRA). August 2009. 199 p.
6. EN 14907: 2005 "Standard gravimetric measurement method for the determination of the PM mass fraction of suspended particulate matter in Ambient air".
7. EN 12341:1999 "Air Quality - Determination of the  $PM_{10}$  fraction of suspended particulate matter — Reference method and field test procedure to demonstrate reference equivalence of measurement methods".
8. Effect of Air Pollution Control on Life Expectancy in the United States: An Analysis of 545 U.S. Counties for the Period from 2000 to 2007 / Correia Andrew W., Pope C. Arden III, Dockery Douglas W., Wang Yuna, Ezzati Majidd, Dominic Francesca // Epidemiology. 2013. Vol. 24. Iss. 1. P. 23—31. doi: 0.1097/EDE.0b013e3182770237.
9. DIRECTIVE 2008/50/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe // Official Journal of the European Union 11.6.2008.
10. WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants // The WHO European Centre for Environment and Health, Bonn Office, WHO Regional Office for Europe coordinated the development of these WHO guidelines.

11. Методические указания 2.1.6-09 «Организация мониторинга загрязнения атмосферного воздуха мелкодисперсными частицами: методические указания. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009.

12. Методические рекомендации по предоставлению данных мониторинга мелкодисперсных взвешенных веществ (PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub>) в атмосферном воздухе Санкт-Петербурга (утв. Распоряжением Комитета по природопользованию и охране окружающей среды от 20 мая 2010 г. №75-р). СПб, 2010. 8 с.

13. Мелник М. Основы прикладной статистики. М., 1983. 242 с.

© Михайловская Ю. С., Мензелинцева Н. В., Карапузова Н. Ю., Лактюшин В. А., Богомолов С. А., 2016

Поступила в редакцию  
в ноябре 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Анализ содержания пыли в атмосферном воздухе мегаполиса / Ю. С. Михайловская, Н. В. Мензелинцева, Н. Ю. Карапузова, В. А. Лактюшин, С. А. Богомолов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 225—237.

Об авторах:

**Михайловская Юлия Сергеевна** — аспирант кафедры безопасности жизнедеятельности в техносфере, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

**Мензелинцева Надежда Васильевна** — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой инженерной графики, стандартизации и метрологии, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, menzelintseva\_nv@mail.ru

**Карапузова Наталья Юрьевна** — канд. техн. наук, доц., Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, karapuzova-ny@mail.ru

**Лактюшин Вадим Анатольевич** — аспирант кафедры инженерной графики, стандартизации и метрологии, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

**Богомолов Сергей Александрович** — аспирант кафедры инженерной графики, стандартизации и метрологии, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

**Yu. S. Mikhailovskaya, N. V. Menzelintseva, N. Yu. Karapuzova, V. A. Laktyushin, S. A. Bogomolov**

## ANALYSIS OF DUST CONTENT IN THE AIR OF A METROPOLIS

The article analyzes the dynamics of the average annual emissions of pollutants from stationary sources of air pollution and the content of solid particles PM<sub>10</sub> and PM<sub>2,5</sub> in the air in Saint-Petersburg.

**К e y w o r d s:** MPC, dust from construction industries, dispersion analysis.

### REFERENCES

1. Serbitskii I. A., ed. *Doklad ob ekologicheskoi situatsii v Sankt-Peterburge v 2014 godu* [Report about environmental situation in Saint-Petersburg in 2014]. Saint-Petersburg, Diton Publ., 2015. 180 p.

2. Azarov V. N., Menzelintseva N. V., Karapuzova N. Yu. [About the assessment of proportion of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2,5</sub> particles in emissions by enterprises of construction industry]. *Vestnik otdeleniya stroitel'nykh nauk RAASN* [News of the construction sciences department of RAACS], 2012, vol. 2, pp. 6—2.

3. WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide Global update 2005. Summary of risk assessment. (WHO/SDE/PHE/OEH/06.02) WHO, 2006, 22 p.
4. National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter; Final Rule. Federal Register. Vol. 71, No. 200, October 17, 2006 / Rules and Regulations ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY.
5.  $PM_{10}$ -Emissionsfaktoren von Abriebspartikeln des Strassenverkehrs (APART). Forschungsauftrag ASTRA 2005/007 auf Antrag des Bundesamtes Für Strassen (ASTRA). August 2009. 199 p.
6. EN 14907: 2005 "Standard gravimetric measurement method for the determination of the PM mass fraction of suspended particulate matter in Ambient air".
7. EN 12341:1999 "Air Quality - Determination of the  $PM_{10}$  fraction of suspended particulate matter — Reference method and field test procedure to demonstrate reference equivalence of measurement methods".
8. Correia Andrew W., Pope C. Arden III, Dockery Douglas W., Wang Yuna, Ezzati Majidd, Dominic Francesca. Effect of Air Pollution Control on Life Expectancy in the United States: An Analysis of 545 U.S. Counties for the Period from 2000 to 2007. *Epidemiology*, 2013, 24(1), pp. 23—31. doi: 0.1097/EDE.0b013e3182770237.
9. DIRECTIVE 2008/50/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. *Official Journal of the European Union*, 11.6.2008.
10. WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. *The WHO European Centre for Environment and Health, Bonn Office, WHO Regional Office for Europe coordinated the development of these WHO guidelines*.
11. Metodicheskie ukazaniya 2.1.6-09 «Organizatsiya monitoringa zagryazneniya atmosfernogo vozdukh melkodispersnymi chastitsami: metodicheskie ukazaniya [Methodology guidelines 2.1.6-09 "Organization of monitoring of air pollution by fine particles: Methodology guidelines"]. Moscow, Federal Center of Hygiene and Epidemiology of [Federal Service on Surveillance for Consumer rights protection and human well-being](#), 2009.
12. Metodicheskie rekomendatsii po predostavleniyu dannykh monitoringa melkodispersnykh vyzhennykh veshchestv ( $RM_{2,5}$  i  $RM_{10}$ ) v atmosfernom vozdukh Sankt-Peterburga [Methodology guidelines on data submission of monitoring of suspended fine substances ( $PM_{2,5}$  and  $PM_{10}$ ) in the air of Saint Petersburg]. SPb, 2010. 8 p.
13. Melnik M. *Osnovy prikladnoi statistiki* [Principals of applied statistics]. Moscow, 1983. 242 p.

*For citation:*

Mikhailovskaya Yu. S., Menzelintseva N. V., Karapuzova N. Yu., Laktyushin V. A., Bogomolov S. A. [Analysis of dust content in the air of a metropolis]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 225—237.

*About authors:*

**Mikhailovskaya Yuliya Sergeevna** — Postgraduate student of Life Safety in Technosphere Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

**Menzelintseva Nadezhda Vasil'evna** — Doctor of Engineering Science, Professor, Head of Engineering Graphics, Standardization and Metrology Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, menzelintseva\_nv@mail.ru

**Karapuzova Natal'ya Yur'evna** — Candidate of Engineering Science, Docent, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, karapuzova-ny@mail.ru

**Laktyushin Vadim Anatol'evich** — Postgraduate student of Engineering Graphics, Standardization and Metrology Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

**Bogomolov Sergei Aleksandrovich** — Postgraduate student of Engineering Graphics, Standardization and Metrology Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

УДК 691.32:620.191.33

**В. А. Перфилов<sup>а</sup>, И. В. Шевцов<sup>б</sup>, Б. Я. Засличко<sup>в</sup>, У. В. Канавец<sup>а</sup>**

<sup>а</sup> *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

<sup>б</sup> *ООО «Нижне-Волжская экспертная компания промышленной безопасности»*

<sup>в</sup> *ООО «Экспертиза промышленной безопасности»*

### **УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ И ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

Представлены результаты экспериментальных исследований по утилизации буровых шламовых, а также сажевых отходов при производстве фибробетонов и обеспечению промышленной и экологической безопасности.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** буровые шламовые отходы, сажевые отходы, фибробетоны, промышленная и экологическая безопасность.

В мировой практике нефтегазовые ресурсы континентального шельфа уже давно стали основными источниками увеличения добычи нефти и газа. В настоящее время доля углеводородов, добываемых на континентальном шельфе, составляет более четверти мирового объема добычи и продолжает возрастать. Россия обладает самым крупным в мире континентальным шельфом, нефтегазовый потенциал которого составляет почти треть суммарных ресурсов недр шельфа Мирового океана.

Освоение нефтегазовых месторождений России требует применения специальных технологий и технических средств при строительстве нефтяных и газовых скважин, что прежде всего связано со специфическими горно-геологическими и климатическими условиями, а также требованиями промышленной и экологической безопасности в районах ведения работ.

Как известно, многие осложнения, возникающие при бурении наклонно-направленных и горизонтальных скважин с большим отходом от устья и большими разворотами по азимуту, так или иначе связаны с типом и качеством применяемого бурового раствора. Плохая очистка скважины, избыточный крутящий момент, зашламовывание ствола скважины, прихваты бурильного инструмента, нарушение устойчивости стенок скважин, потеря циркуляции, осложнения при спуске каротажных снарядов и обсадных колонн, а также другие проблемы, сильно замедляющие и удорожающие бурение, как правило, являются следствием несоответствия бурового раствора условиям бурения.

Для того чтобы буровой раствор соответствовал программным значениям проекта необходимо в процессе бурения скважины обеспечивать эффективную работу системы очистки для удаления активной выбуренной породы. Грамотно настроенная система очистки бурового раствора может способствовать проведению скважины с минимальными затратами на приготовление и обработку бурового раствора, что, в свою очередь, приведет к удешевлению проекта в целом.

В процессе бурения скважин необходимо добиться сокращения объемов сброса буровых отходов и пластовой воды на морских нефтегазодобывающих сооружениях. Это вполне осуществимо в технологическом смысле и в боль-

шинстве случаев сулит экономические выгоды. Нет особых технических сложностей и для сведения таких сбросов к нулевому уровню, используя новейшие технологии обратной закачки, переработки отходов по принципу кругового замкнутого цикла и утилизации буровых отходов. Там, где геологические условия не позволяют закачивать отходы в скважину, необходимо транспортировать их на сушу для размещения и переработки.

Следует усилить контроль за соблюдением законодательных норм, направленных на снижение объемов сбросов или достижение «нулевых сбросов» и не позволять корпорациям экономить на экологических технологиях. Порядок обращения с отходами и экологический контроль всех видов хозяйственной деятельности в системе обращения с отходами при обустройстве месторождения регулируется нормативно-правовыми документами<sup>1</sup> [1—4].

В соответствии с приказом МПР РФ от 15 июня 2001 г. № 511 «Об утверждении критериев отнесения опасных отходов к классу опасности для окружающей природной среды» отходы по степени воздействия на окружающую природную среду вредных веществ, содержащихся в них, делятся на пять классов опасности:

- отходы 1 класса опасности (чрезвычайно опасные);
- отходы 2 класса опасности (высоко опасные);
- отходы 3 класса опасности (умеренно опасные);
- отходы 4 класса опасности (малоопасные);
- отходы 5 класса опасности (практически неопасные).

Технологические процессы, связанные с бурением скважин, являются потенциально опасными источниками загрязнения окружающей среды и ее отдельных компонентов. Возможное их воздействие на основные компоненты окружающей среды (воздух, воду, растительный, животный мир и человека) обусловлено токсичностью природных углеводородов, их спутников, большим разнообразием химических реактивов, используемых в технологических процессах.

К технологическим отходам бурения относятся буровой шлам, отработанные буровые технологические жидкости и буровые сточные воды. Они образуются в технологическом процессе промывки скважины.

В процессе выполнения работ при освоении месторождения предусмотрены следующие мероприятия по безопасному обращению с отходами и минимизации объемов их образования:

---

<sup>1</sup> Инструкция по охране окружающей среды при бурении скважин на нефть и газ на суше (РД 39-133-94). М. : Роснефть, 1994;

Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» от 24.06.98 № 89-ФЗ (с учетом изменений и дополнений, внесенных соответствующими федеральными законами);

Приложение V к Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененная Протоколом 1978 г. к ней, с поправками (Консолидированный текст 2004 г.). МАРПОЛ 73/78. Книги I и II. СПб., ЗАО ЦНИИМФ, 2005;

Федеральный классификационный каталог отходов (утв. приказом МПР РФ от 02.12.02 г. № 786, с изменениями от 30.07.03 г.);

Санитарные правила для плавучих буровых установок № 4056-85 от 23 декабря 1985 г. Утверждены зам. главного государственного врача СССР В. Е. Ковшило.

улучшение качества очистки бурового раствора путем применения прогрессивных технологий и технических средств (вибросит, пескоотделители, илоотделители, дегазаторы, центрифуги);

максимальное использование отработанного бурового раствора для приготовления рабочих буровых растворов при проходке последующих интервалов;

сортировка отходов, их сбор и хранение в герметичных емкостях и контейнерах на морских платформах;

порядок обращения с отходами предусматривает передачу специализированным предприятиям, имеющим лицензии на осуществление деятельности по обращению с опасными отходами.

Все большее количество площадей в настоящее время отводится под промышленные отходы, в число которых входят сажевые отходы теплогенерирующих установок, зола, образующаяся в результате сжигания каменного угля на теплоэлектростанциях (ТЭС), отходы котельных установок, а также сажа, образовавшаяся вследствие работы нефтегазоперерабатывающих предприятий. Данные продукты являются источником поступления в окружающую среду вредных химических и биологических образований, которые воздействуют как на конкретные части природы, так и на биосферу в целом. Скопление промышленных отходов является насущной проблемой для современного общества. Очевидно, что данная ситуация представляет серьезную угрозу окружающей среде. Кроме того, данные площади требуют значительных затрат на свое содержание, что приводит к увеличению себестоимости тепло- и энергоносителей. В качестве решения данной проблемы предлагается утилизация сажевых отходов путем применения их в виде добавки при производстве базальтофибробетонных смесей.

В Волгоградском государственном архитектурно-строительном университете разработаны технологии получения композиционных материалов с использованием отходов нефтегазодобычи. В частности, широкое применение получило производство фибробетонов, имеющих в своем составе буровые шламовые отходы.

На данный момент разработано огромное множество высокопрочных композиционных материалов, в частности бетонов. Это связано с тем, что предъявляются повышенные требования не только к качественным характеристикам бетонов, таким как долговечность, прочность и трещиностойкость, но также ставится задача сокращения сроков строительства путем применения соответствующих технологий, облегчающих трудозатраты в процессе непосредственного использования. Также актуальным остается вопрос о снижении себестоимости бетонов, так как известно, что бетонные работы являются одними из самых дорогостоящих.

Решить качественные, а также технико-экономические задачи предлагается путем трехмерного армирования бетонной матрицы базальтовым или стальным волокном (фиброй) [5—7], а также ее модифицированием на микроуровне с применением отходов бурения и сажи.

В ходе исследований изучалось влияние на физико-механические и прочностные характеристики фибробетонов комплексного введения в состав смеси базальтовых волокон-фибр, пластифицирующей добавки, а также бу-

ровых и сажевых отходов. Был осуществлен подбор бетонной смеси с оптимальным содержанием компонентов.

В качестве связующего использовался портландцемент М500 Д0 производства ЗАО «Осколцемент». Мелким заполнителем выступали высушенные и измельченные буровые шламовые отходы. Соотношение вяжущего и заполнителя составляло 1:2.

Для увеличения прочности на макроуровне в качестве дисперсно-армирующего компонента использовались базальтовые волокна диаметром 13...17 мкм и длиной 6...12 мм с прочностью на растяжение до 2000 МПа. Дозировка фибровых волокон осуществлялась в диапазоне от 0,8 кг/м<sup>3</sup> до 1,6 кг/м<sup>3</sup>.

Для упрочнения структуры на микроуровне в смесь вводили суперпластификатор «Полипласт СП-3», который представляет собой порошок коричневого цвета, отвечающий ТУ 5870-006-58042865-05. Он способствует улучшению смачивания, удобоукладываемости и равномерности диспергирования цемента.

Дополнительно в бетонную смесь вводился тонкоизмельченный порошок технического углерода-сажи с размерами частиц не более 5 мкм, который увеличивает подвижность, что позволяет снизить количество воды затворения.

Количество вводимого суперпластификатора составляло 0,5 % от массы портландцемента. Содержание сажевых отходов для разных составов находилось в пределах от 0,5 % до 2,0 % от массы портландцемента.

Бетонную смесь готовили по следующей методике: комплексную добавку, включающую суперпластификатор «Полипласт СП-3» и технический углерод-сажу, предварительно растворяли с небольшим количеством воды затворения в ультразвуковом диспергаторе с частотой 20 кГц в течение 1 мин до получения однородного раствора и вводили в бетонную смесь после предварительного перемешивания портландцемента, бурового шлама, фибровых волокон и оставшейся воды затворения.

Механические свойства данной смеси определяли путем изготовления образцов-балочек размером 40 × 40 × 16 мм и твердения их в естественных условиях. По истечении 28 сут данные образцы испытывались на прочность.

Анализ экспериментальных данных показал, что добавление в сырьевую смесь высокодисперсного волокнистого наполнителя, суперпластификатора «Полипласт СП-3», а также отходов бурения и технического углерода (сажа) при указанных соотношениях входящих в состав компонентов в возрасте 28 сут, способствует увеличению прочности на сжатие на 27 % по отношению к эталонным образцам. Также результаты показали увеличение прочности на изгиб на 43 %.

Введение технического углерода в фибробетонную смесь улучшает ее зерновой состав, уменьшая расслоение и повышая однородность бетона. Это является огромным плюсом в современном строительстве, где, как известно, преобладает монолитное строительство, в котором применяют довольно подвижные смеси, склонные к расслоению.

Применение бурового шлама, извлеченного из скважин Каспийского бассейна, включающего до 80...90 % песчаников и известняка, способствовало образованию прочной цементно-шламовой матрицы и утилизации буровых отходов, загрязняющих окружающую среду.

Таким образом, введение в фибробетонные смеси буровых и сажевых отходов приводит в первую очередь к улучшению реологических свойств данных бетонов, одновременно позволяя улучшить экологическое состояние окружающей среды. Наряду с этим решается проблема освобождения огромных полигонов, занятых отходами, представляющих опасность как для водной, так и для атмосферной среды. Так же очевиден экономический эффект, который выражается в снижении стоимости за счет использования промышленных отходов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сборник удельных показателей образования отходов производства и потребления. М., 1999.
2. Патин С. А. Нефть и экология континентального шельфа. М.: ВНИРО, 2001. 247 с.
3. Предельное количество накоплений токсичных промышленных отходов на территории предприятия (организации). М., 1985.
4. Порядок накопления, транспортировки, обезвреживания и захоронения токсичных промышленных отходов (санитарные правила). М.: Минздрав СССР, 1985.
5. Перфилов В. А., Аткина А., Кусмарцева О. А. Фибробетоны с высокодисперсными волокнистыми наполнителями // Международная науч.-практич. конф. «Малоэтажное строительство» в рамках проекта «Доступное и комфортное жилье гражданам России: технологии и материалы, проблемы и перспективы развития в Волгоградской области». Волгоград: ВолгАСУ, 2009. С. 89—91.
6. Перфилов В. А., Зубова М. О., Неизвестный Д. Л. Применение базальтовых волокон и модифицирующей добавки для повышения прочностных характеристик тяжелых бетонов // Известия вузов. Строительство. 2011. № 12. С. 46—49.
7. Перфилов В. А., Алаторцева У. В., Тюрин А. А. Фибробетонная смесь. Патент на изобретение № 2008133782/03, опубл. 20.04.2010 г.

© Перфилов В. А., Шевцов И. В., Засличко Б. Я., Канавец У. В., 2016

Поступила в редакцию  
в декабре 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Утилизация отходов нефтегазодобывающих и теплогенерирующих производств для повышения промышленной и экологической безопасности / В. А. Перфилов, И. В. Шевцов, Б. Я. Засличко, У. В. Канавец // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 238—243.

Об авторах:

**Перфилов Владимир Александрович** — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой морских нефтегазовых сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

**Шевцов Игорь Васильевич** — исполнительный директор, ООО «Нижне-Волжская экспертная компания промышленной безопасности». Российская Федерация, 400087, г. Волгоград, ул. Новороссийская, 67, [expertvolgograd@mail.ru](mailto:expertvolgograd@mail.ru)

**Засличко Борис Яковлевич** — начальник отдела экспертизы горнорудного и нефтегазового оборудования, ООО «Экспертиза промышленной безопасности». Российская Федерация, 400105, г. Волгоград, ул. им. маршала Еременко, 108, оф. 211, [expertvolgograd@mail.ru](mailto:expertvolgograd@mail.ru)

**Канавец Ульяна Владимировна** — канд. техн. наук, доцент кафедры морских нефтегазовых сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [uliana2102@yandex.ru](mailto:uliana2102@yandex.ru)

**V. A. Perfilov, I. V. Shevtsov, B. Ya. Zasluchko, U. V. Kanavets**

## **DISPOSAL OF WASTES OF OIL-EXTRACTING AND HEAT PRODUCING PRODUCTIONS FOR THE INCREASE OF INDUSTRIAL AND ENVIRONMENTAL SAFETY**

The article presents the results of the experimental researches on boring mud and soot wastes disposal at the production of fibrous concretes and providing of industrial and environmental safety.

**Key words:** boring mud wastes, soot wastes, fibrous concrete, industrial and environmental safety.

### REFERENCES

1. *Sbornik udel'nykh pokazatelei obrazovaniya otkhodov proizvodstva i potrebleniya* [Set of specific indicators of waste formation in production consumption]. Moscow, 1999.
2. Patin S. A. *Neft' i ekologiya kontinental'nogo shel'fa* [Oil and ecology of coastal shelf]. Moscow, VNIRO Publ., 2001. 247 p.
3. *Predel'noe kolichestvo nakoplenii toksichnykh promyshlennykh otkhodov na territorii predpriyatiya (organizatsii)* [Limit amount of accumulation of toxic industrial wastes on the territory of an enterprise (organization)]. Moscow, 1985.
4. *Poryadok nakopleniya, transportirovki, obezvrezhivaniya i zakhroneniya toksichnykh promyshlennykh otkhodov (sanitarnye pravila)* [Order of toxic industrial waste accumulation, transportation, neutralization and disposal (sanitary regulations)]. Moscow, Ministry of Healthcare of the USSR Publ., 1985.
5. Perfilov V. A., Atkina A., Kusmartseva O. A. [Reinforced concrete with finely-dispersed fiber fillers]. *Mezhdunarodnaya nauch.-praktich. konf. «Maloetazhnoe stroitel'stvo» v ramkakh proekta «Dostupnoe i komfortnoe zhil'e grazhdanam Rossii: tekhnologii i materialy, problemy i perspektivy razvitiya v Volgogradskoi oblasti»* [Int. Sc.-Pract. Conf. "Low-rise construction" within the project "Affordable and comfortable housing for citizens of Russia: technologies and materials, problems and prospects of development in Volgograd Oblast"]. Volgograd, VSUACE Publ., 2009, pp. 89—91.
6. Perfilov V. A., Zubova M. O., Neizvestnyi D. L. [The of application of basalt fibres and modifying additive for increase strength characteristics of heavy concrete]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Construction], 2011, no. 12, pp. 46—49.
7. Perfilov V. A., Alatorseva U. V., Tyurin A. A. *Fibrobetonnyaya smes'* [Reinforced concrete mixture. Pat. no. 2008133782/03 Russian Federation].

#### *For citation:*

Perfilov V. A., Shevtsov I. V., Zasluchko B. Ya., Kanavets U. V. [Disposal of wastes of oil-extracting and heat producing productions for the increase of industrial and environmental safety]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 238—243.

#### *About authors:*

**Perfilov Vladimir Aleksandrovich** — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Sea Oil and Gas Constructions Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

**Shevtsov Igor' Vasil'evich** — Executive Director, LLC "Lower Volga Expert Company of Industrial Safety". 67, Novorossiiskaya St., Volgograd, 400087, Russian Federation, [expertvolgograd@mail.ru](mailto:expertvolgograd@mail.ru)

**Zasluchko Boris Yakovlevich** — Head of the Department on Examination of Mining and Oil and Gas Equipment, LLC "Expert Examination of Industrial Safety". Office 211, 108, Marshal Eremenko St., Volgograd, 400105, Russian Federation, [expertvolgograd@mail.ru](mailto:expertvolgograd@mail.ru)

**Kanavets Ul'yana Vladimirovna** — Candidate of Engineering Science, Docent of Sea Oil and Gas Constructions Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [uliana2102@yandex.ru](mailto:uliana2102@yandex.ru)

УДК 625.72

**С. В. Алексиков, А. И. Болдин, В. Л. Харланов**

*Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

## **ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ ПЛОТНОСТИ ПАРКОВКИ АВТОМОБИЛЕЙ НА АВТОМАГИСТРАЛЯХ ВОЛГОГРАДА**

Описаны размеры парковок автомобилей на городских улицах.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** автомобильные дороги, парковки, автомобили.

Среди проблем, порожденных высоким уровнем автомобилизации городского населения, задача обеспечения стоянок автомобилей у административных, общественных и производственных зданий являются наиболее острыми. Наиболее сложна ситуация в крупных городах со сложившейся застройкой. Мировой опыт показывает, что решить эту проблему можно только за счет использования свободной ширины проезжей части и тротуаров улиц, устройства специальных карманов и внеуличных автостоянок.

Территорию для хранения автомобилей можно делить по способу хранения и продолжительности нахождения на них автомобилей [1, 2]:

1. Автостоянки большой продолжительности хранения (более 8 ч) у предприятий, учреждений и комплексов для автомобилей, принадлежащих рабочим, служащим и посетителям, оправданы в центральной или старой части города со сложившейся тесной застройкой.

2. Автостоянки средней продолжительности хранения (2...4 ч) у зданий и сооружений, периодически собирающих большие массы людей (стадионы, театры, киноконцертные залы, рестораны, крупные торговые центры).

3. Автостоянки кратковременной продолжительности хранения (до 2 ч) у вокзалов, универсальных магазинов, рынков, спортивных сооружений.

Мировая практика показывает, что наиболее экономичным способом хранения автомобилей является использование свободной (выделенной) полосы проезжей части улиц или специальных карманов (рис. 1).



Рис. 1. Парковка автомобиля в кармане (ФРГ)

При разработке проектных решений по устройству прибордюрных парковок необходимо знать: размеры машино-места, ширину парковки, удельную плотность парковки, конструкцию парковочной площадки, условия эффективного применения различных схем парковки в зависимости от уровня загрузки улицы движением транспорта.

Размеры машино-места определяются средневзвешенной расчетной площадью припаркованного расчетного автомобиля и защитной зоной вокруг него. В настоящее время проектирование автопарковок выполняется на основе нормативной плотности парковки транспортных средств (ТС), разработанной в 80-х годах прошлого столетия<sup>1</sup>. В качестве расчетного были использованы легковые автомобили моделей ВАЗ и ГАЗ с размером машино-места 13 м<sup>2</sup> [1—3, 8]. В связи с существенным изменением автомобильного парка назрела необходимость в пересмотре расчетной площади машино-места и плотности парковки ТС.

Для обоснования размеров машино-места на УДС г. Волгоград выполнен анализ состава парка припаркованных автомобилей и измерены их зазоры безопасности. В результате обследования парковок более 1700 автомобилей Центрального и Ворошиловского района установлено, что в структуре припаркованного автотранспорта наиболее представительны автомобили малого и среднего класса (рис. 2).

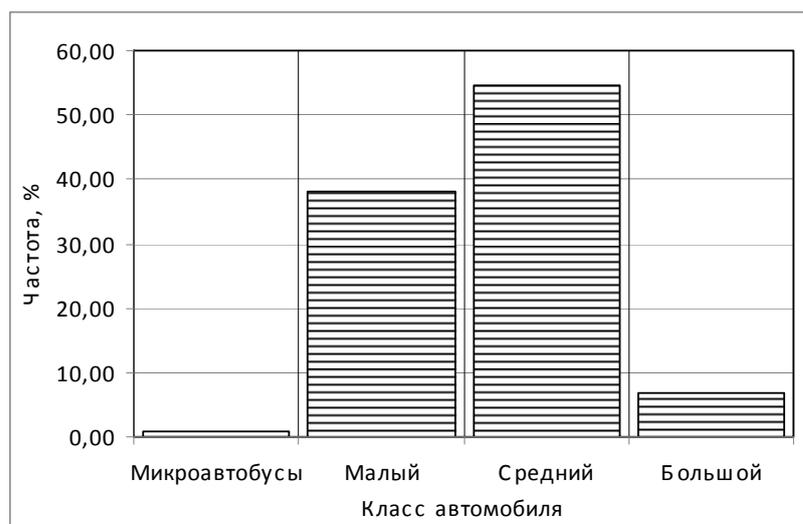


Рис. 2. Состав парка припаркованных автомобилей

Средневзвешенная расчетная площадь припаркованного автомобиля  $F_p$  рассчитывалась согласно СП 113.13330.2012:

$$F_p = \frac{\sum F_i \mu_i}{100},$$

<sup>1</sup> СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02—85\*.

где  $F_i$  — площадь, занимаемая типовым автомобилем,  $m^2$ ;  $\mu_i$  — процентное содержание типового автомобиля в потоке.

Расчеты показали, что средневзвешенная длина ТС равна 4578 мм, ширина — 1763 мм, расчетная площадь припаркованного автомобиля 8,07  $m^2$ .

С целью обоснования защитной зоны припаркованного транспортного средства выполнены замеры расстояний бампера от бордюра и между параллельно стоящими автомобилями. Указанные расстояния имеют нормальное распределение (рис. 3, 4).

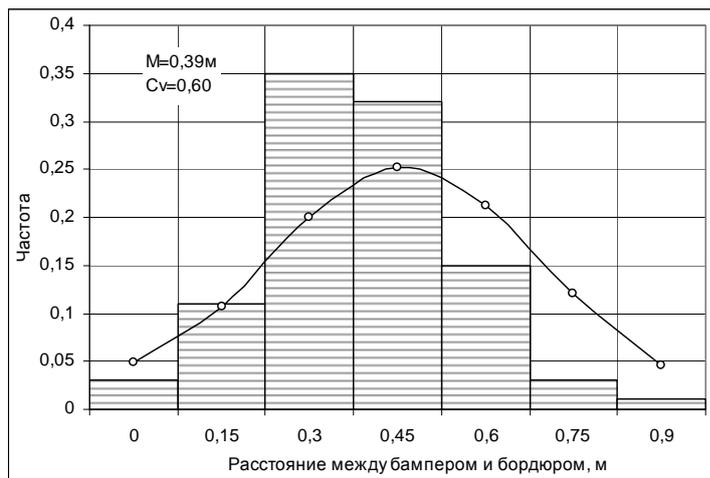


Рис. 3. Распределение расстояния бампера припаркованного автомобиля от бордюра

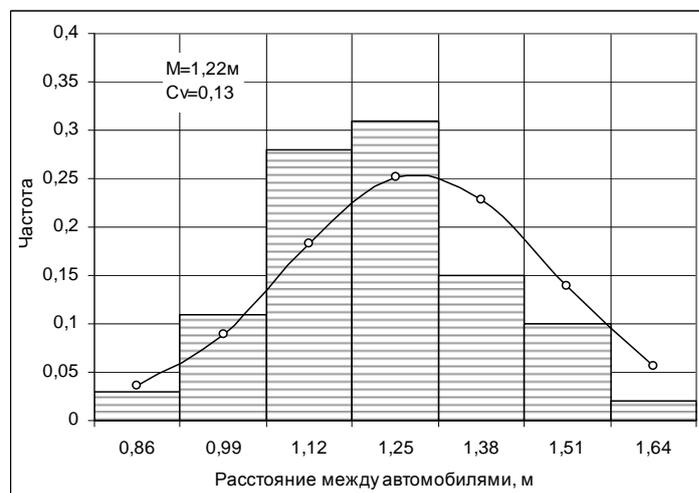


Рис. 4. Распределение расстояния между параллельно припаркованными автомобилями

Расчетные расстояния безопасности вокруг автомобилей и площадь машино-места с надежностью 90 % приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

*Расстояния безопасности вокруг автомобиля и площадь машино-места*

Параметр	$\bar{L}$ , м	$C_v$	Расчетные с $P = 90\%$	
			$L_{\max}$ , м	$L_{\min}$ , м
Расстояние безопасности между автомобилями	1,22	0,16	1,48	0,96
Расстояние безопасности от бампера до бордюра	0,39	0,60	0,70	0,08
Расчетная длина машино-места, м	5,47	—	5,77	5,16
Расчетная ширина машино-места, м	2,98	—	3,25	2,72
Расчетная площадь машино-места, м <sup>2</sup>	16,3	—	18,7	14,0

Расстояние безопасности со стороны багажника автомобиля, согласно СП 113.13330.2012, принято 0,5 м.

С учетом выполненных исследований расчетная длина машино-места изменяется от 5,16 до 5,77 м, ширина 2,72...3,25 м. Площадь парковочного места автомобиля, установленного к бордюру под 90° составляет 14,0...18,74 м<sup>2</sup>.

Ширина полосы для парковки ТС зависит от угла установки ТС  $\alpha$ , длины  $l$  и ширины  $b$  машино-места рассчитывается по формуле

$$B = l \sin \alpha + b \cos \alpha. \quad (1)$$

При парковке параллельно бордюра ширина полосы определяется шириной расчетного автомобиля  $b_a$ , защитной зоны у бордюра ( $b_6 = 0,08...0,70$  м) и защитной зоной со стороны проезжающих автомобилей (0,50 м):

$$B = b_a + b_6 + 0,50. \quad (2)$$

При парковке перпендикулярно бордюра ширина полосы парковки определяется длиной расчетного автомобиля  $l_a$ , защитной зоны у бордюра ( $b_6 = 0,08...0,70$  м) и защитной зоной со стороны проезжающих автомобилей (0,50 м):

$$B = l_a + b_6 + 0,50. \quad (3)$$

Расчеты по формулам (1)—(3) показали, что ширина полосы парковки, с учетом защитной зоны, изменяется от 2,65 до 5,77 м. (табл. 2). При установке автомобилей параллельно бордюру устройство парковки возможно в пределах выделенной полосы движения<sup>2</sup> [4, 5]. При иной установке ТС с одной или

<sup>2</sup> СП 113.13330.2012 Стоянки автомобилей. Актуализированная редакция СНиП 21-02—99 [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200092706>;

МГСН 1. 01—97. Московские городские строительные нормы. Временные нормы и правила проектирования планировки и застройки г. Москвы. Утвержден постановлением Правительства г. Москвы от 12.08.97. № 592. Ч. 1. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.docload.ru/Basesdoc/6/6677/index.htm>;

двух сторон проезжей части необходима организация одностороннего движения автомобилей или устройство специальных карманов за счет тротуаров или зеленой зоны вдоль проезжей части дороги<sup>3</sup> [6].

Т а б л и ц а 2

*Ширина полосы парковки автомобиля (с учетом расстояния безопасности), м*

Ширина	Угол парковки автомобилей относительно бордюра, град				
	0	30	45	60	90
Средняя (матем. ожид.)	2,65	5,30	5,97	6,22	5,47
Максимальная, $P = 90\%$	2,96	5,68	6,38	6,62	5,77
Минимальная, $P = 90\%$	2,34	4,92	5,57	5,83	5,16

Удельная плотность парковки нескольких ТС зависит от схемы установки автотранспорта [7, 8]. При парковке под углом  $90^\circ$  плотность парковки автомобиля определяется шириной машино-места с учетом зоны безопасности. При парковке параллельно бордюру плотность парковки определяется длиной ТС и условиями въезда-выезда с парковочного места.

При парковке под углом ширину парковочного места одиночного автомобиля можно рассчитать по формуле

$$B = l \cos \alpha + b \sin \alpha.$$

С увеличением угла парковки ее ширина уменьшается с 6,59 до 4,47 м (рис. 5). При плотной парковке нескольких ТС между соседними автомобилями образуется общая зона (рис. 6).

Ширина общей зоны парковки  $Y$  смежных автомобилей зависит от угла установки ТС  $\alpha$ , длины  $l$  и ширины  $b$  машино-места:

$$Y = l \cos \alpha - \frac{b \cos \alpha^2}{\sin \alpha}. \quad (4)$$

Пособие к МГСН 5.01-94. Стоянки легковых автомобилей. МАРХИ. Вып. 1. 1997. [Электронный ресурс] URL: <http://www.gosthelp.ru/text/PosobieMGSN50194Posobie.html>.

<sup>3</sup> Парковки и паркинги. [Электронный ресурс] URL: <http://www.stroyka.ru/Materials/37/329485/parkovki-i-parkingi/>;

СНиП 21-02—99\*. Стоянки автомобилей. Переизд. СНиП 21-02-99 с изм. № 1 ; введ. 2000-07—01. М. : ФГУП ЦПП, 2004;

СНиП 2.07.01—89\*. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений / ЦНИИП градостроительства. М. : ГУП ЦПП, 1994;

СНиП 2.07.01—89\* (2000). Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений / ЦНИИП градостроительства. М. : ГУП ЦПП. ГОССТРОЙ РОССИИ, 2000;

СП 42.13330.2011. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01—89\*. М. : ОАО «ЦПП», 2011.

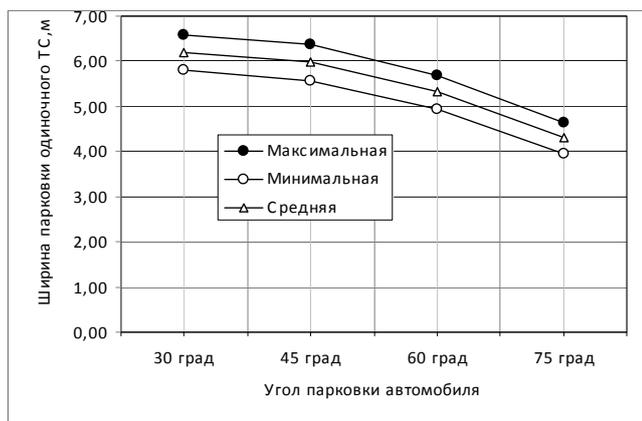


Рис. 5. Ширина парковочного места одиночного автомобиля

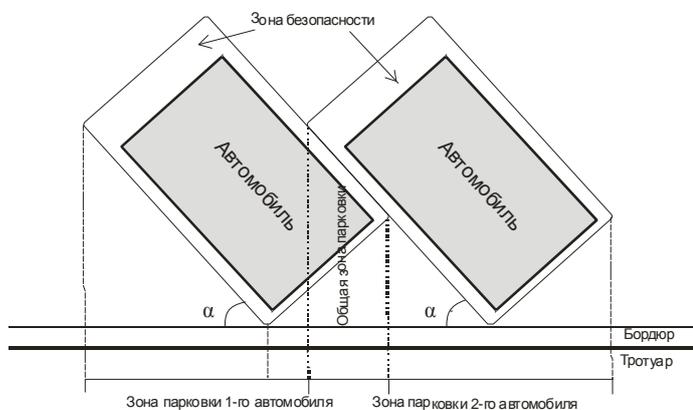


Рис. 6. Расчетная схема парковки автомобилей под углом к бордюру

Наибольшая ширина общей зоны парковки наблюдается при установке ТС под углом 60°, увеличение емкости парковочного места достигает 35 % (рис. 7). С дальнейшим увеличении угла  $\alpha$  величина  $U$  снижается и при  $\alpha = 90^\circ$  равна 0.

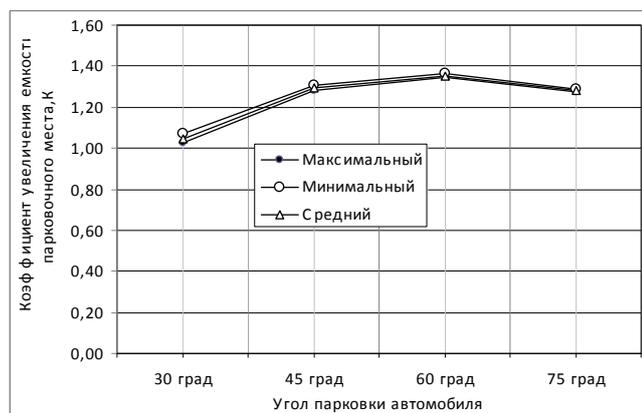


Рис. 7. Зависимость увеличения емкости парковочного места от угла парковки ТС

Выполненные исследования позволили обосновать удельную плотность различных схем парковки современных автомобилей, которая рекомендуется использовать при разработке проектных решений (табл. 3). При этом следует учитывать концевые участки парковочных площадок, где установка ТС требует большей или меньшей площади.

Таблица 3

*Удельная плотность прибордюрной парковки автомобилей (на 100 кв. м)*

Размеры	Удельная плотность парковки автомобилей в зависимости от угла установки ТС, град.					
	0	30	45	60	75	90
Минимальная	12,9	15,6	21,8	26,7	29,8	30,8
Максимальная	14,0	18,6	26,0	31,8	35,5	36,8
Средняя	13,4	17,0	23,7	29,1	32,4	33,6

Примечание: разрыв между машино-местом автомобилей принят 2,0 м для условия непрерывного въезда и выезда ТС с прибордюрной парковки.

Выполненные исследования позволяют оценить емкость прибордюрного пространства городских дорог и выполнить проектирование схемы парковок современных легковых автомобилей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Руководство по проектированию городских улиц и дорог. М.: Стройиздат, 1980.
2. Состояние организации перевозок пассажиров общественным транспортом в малых городах, на примере городов Ахтубинска и Дубовки / А. В. Куликов, С. Ю. Фирсова, А. Н. Карагодина, Р. Я. Кашманов // Современные направления теоретических и прикладных исследований 2015 : матер. Интернет-конф., Украина, 17—29 марта 2015 г. Секция «Транспорт», подсекция «Автомобильные перевозки». URL: <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/transportation-115/trucking-115/24618-115-059>.
3. *Водолажский И. С., Гудков В. А., Куликов А. В.* Анализ состояния городского общественного пассажирского транспорта в Волгограде // Тезисы докладов смотря-конкурса научных, конструкторских и технологических работ студентов Волгоградского гос. технического университета, 14—17 мая 2013 г. / ВолгГТУ, Совет СНТО. Волгоград, 2013. С. 120—121.
4. *Сильянов В. В.* Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц: учебник для вузов. М., 2008. 123 с.
5. *Немчинов М. В., Рудакова В. В.* Строительство городских улиц и дорог. Ч. 2. М.: Экон-Информ, 2010. 330 с.
6. Методические рекомендации по проектированию площадок для стоянок автомобилей и автобусных остановок / СоюздорНИИ. М., 2008. URL: [http://snipov.net/c\\_4676\\_snip\\_111100.html](http://snipov.net/c_4676_snip_111100.html)
7. Направления развития автомобильного транспорта Волгоградской области / В. А. Гудков, А. В. Вельможин, В. С. Поленичкин, А. В. Куликов // Повышение эффективности эксплуатации транспорта: межвуз. науч. сб. Саратов, 2001. С. 126—129.
8. *Turner D.* Red Routes and Parking // Parking News. 1999. April. P. 16—19.

© Алексиков С. В., Болдин А. И., Харланов В. Л., 2016

Поступила в редакцию  
в декабре 2015 г.

Ссылка для цитирования:

*Алексиков С. В., Болдин А. И., Харланов В. Л.* Обоснование расчетной плотности парковки автомобилей на автомагистралях Волгограда // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 244—252.

Об авторах:

**Алексиков Сергей Васильевич** — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [al34rus@mail.ru](mailto:al34rus@mail.ru)

**Болдин Александр Игоревич** — аспирант кафедры строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

**Харланов Владимир Леонтьевич** — д-р техн. наук, доцент, проф. кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

**S. V. Aleksikov, A. I. Boldin, V. L. Kharlanov**

## JUSTIFICATION OF THE CALCULATED DENSITY OF CAR PARKS ON HIGHWAYS IN VOLGOGRAD

The sizes of car parks in the city streets are described.

Key words: roads, car park, cars.

### REFERENCES

1. *Rukovodstvo po proektirovaniyu gorodskikh ulits i dorog* [The design manual for urban streets and roads]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1980.
2. Kulikov A. V., Firsova S. Yu., Karagodina A. N., Kashmanov R. Ya. [State organization of transportation of passengers in public transport in towns, on the example of cities Akhtubinsk and Dubovki]. *Sovremennye napravleniya teoreticheskikh i prikladnykh issledovaniy 2015 : mater. Internet-konf., Ukraina, 17—29 marta 2015 g.* [Modern tendencies in theoretical and applied researches 2015. Proc. of the Int. Conf., Ukraine, 17—29 March, 2015]. Access: <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/transportation-115/trucking-115/24618-115-059>.
3. Vodolazhskii I. S., Gudkov V. A., Kulikov A. V. [Analysis of the state of city public passenger transport in Volgograd]. *Tezisy dokladov smotra-konkursa nauchnykh, konstruktorskikh i tekhnologicheskikh rabot studentov Volgogradskogo gos. tekhnicheskogo universiteta, 14—17 maya 2013 g.* [Theses of reports of a review competition of scientific, design and technological works by the students of Volgograd State Technical University, 14—17 May, 2013]. Volgograd, 2013. Pp. 120—121.
4. Sil'yanov V. V. *Transportno-ekspluatatsionnye kachestva avtomobil'nykh dorog i gorodskikh ulits: uchebnyk dlya vuzov* [Transport and performance characteristics of highways and city streets: textbook for higher education institutions]. Moscow, 2008. 123 p.
5. Nemchinov M. V., Rudakova V. V. *Stroitel'stvo gorodskikh ulits i dorog. Ch. 2* [Construction of city streets and roads. Part. 2]. Moscow, Ekon-Inform Publ., 2010. 330 p.
6. *Metodicheskie rekomendatsii po proektirovaniyu ploshchadok dlya stoyanok avtomobilei i avtobusnykh ostanovok* [Methodological recommendations on design of parking facilities and bus-stops]. Moscow, 2008. URL: [http://snipov.net/c\\_4676\\_snip\\_111100.html](http://snipov.net/c_4676_snip_111100.html)
7. Gudkov V. A., Vel'mozhin A. V., Polenichkin V. S., Kulikov A. V. [Tendencies of development of automobile transport in Volgograd Oblast]. *Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii transporta: Mezhevuz. nauch. sb.* [Increase of efficiency of vehicle operation: Interacademic sc. set.] Saratov, 2001. Pp. 126—129.
8. Turner D. Red Routes and Parking. *Parking News*, 1999. April. Pp. 16—19.

For citation:

Aleksikov S. V., Boldin A. I., Kharlanov V. L. [Justification of the calculated density of car parks on highways in Volgograd]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 244—252.

*About authors:*

**Aleksikov Sergei Vasil'evich** — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Construction and Operation of Transport Works Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [al34rus@mail.ru](mailto:al34rus@mail.ru)

**Boldin Aleksandr Igorevich** — Postgraduate student of Construction and Operation of Transport Works Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

**Kharlanov Vladimir Leont'evich** — Doctor of Engineering Science, Docent, Professor of Engineering Structures, Foundations and Safety of Constructions Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

УДК 625.72

**С. В. Алексиков, А. И. Болдин, Б. Х. Санжапов**

*Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПАРКОВОК НА АВТОМАГИСТРАЛЯХ ВОЛГОГРАДА**

Описаны технические характеристики парковок автомобилей на городских улицах.

К л ю ч е в ы е с л о в а: автомобильные дороги, парковки, автомобили.

Оценка современного состояния транспортной системы больших городов РФ показывает острую необходимость развития сети автомобильных парковок вдоль основных автомагистралей [1]. Это позволит освободить первую полосу движения от припаркованного автотранспорта и повысит пропускную способность городских дорог на 25...30 % [2, 3]. Отечественный и зарубежный опыт показывает, что при продуманной организации дорожного движения и рациональном размещении автопарковок в прибордюрной зоне дорог, специальных карманах на проезжей части и прилегающих к магистралям местных проездах, проблема транспортных пробок будет сведена к минимуму<sup>1</sup>.

Для разработки предложений по организации парковочного пространства на УДС г. Волгограда в 2013—2015 гг. сотрудниками кафедры строительства и эксплуатации транспортных сооружений ВолгГАСУ выполнены исследования участков несанкционированных и организованных парковок легковых автомобилей в Центральном, Дзержинском и Ворошиловском районах города (рис. 1).



Рис. 1. Несанкционированная парковка на первой полосе пр. Ленина

<sup>1</sup> СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02—85\*.

Обследования позволили выявить проблемные места стихийной парковки автомобилей на первой полосе движения, в зеленой зоне, на тротуарах, в зоне остановок общественного транспорта.

Обеспеченность организованными парковками только в Центральном районе г. Волгограда в виде парковочных карманов составляет 4 %.

Припаркованные автомобили на первой полосе создают помехи для движения общественного транспорта, приводят к снижению скорости транспортного потока до 20 % (рис. 2). Перестроения транспорта с первой полосы на вторую в местах стоянки автомобилей создают предпосылки для дорожно-транспортных происшествий [4].

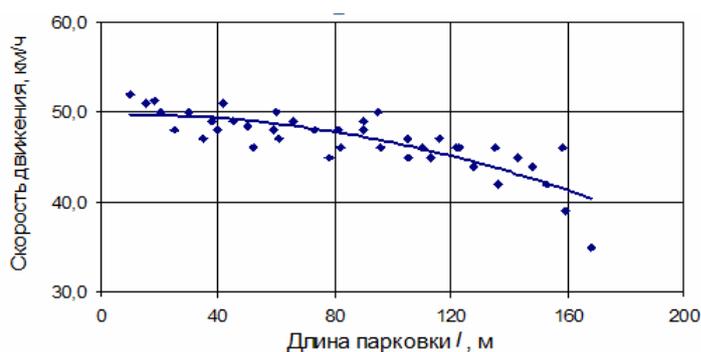


Рис. 2. Снижение средней скорости транспортного потока с увеличением длины парковки на первой полосе [1]

Для разработки проектных решений по устройству парковок легковых автомобилей выполнены исследования плотности парковки транспортных средств при различной схеме их установки, их преимущества и недостатки.

Исследования показали нормальность распределения расстояния между припаркованными автомобилями (рис. 3). Анализ состава припаркованных автомобилей по их размерам позволил обосновать расчетную площадь одного машино-места, равную 8,07 м<sup>2</sup>.

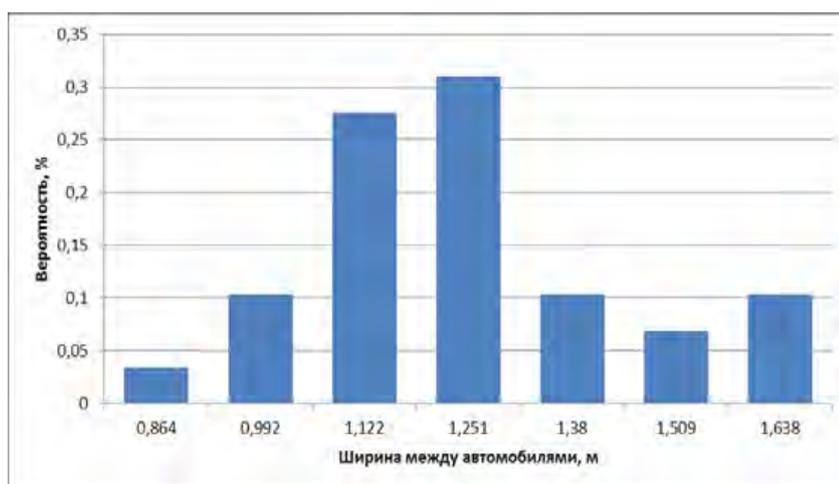


Рис. 3. Гистограмма расстояния между автомобилями на ул. Советской

Удельная плотность парковки автотранспорта в зависимости от схемы стоянки изменяется от 0,13 авт./м до 0,36 авт./м. Минимальная ширина парковки изменяется в пределах 2,76...5,50 м (табл.).

*Характеристики парковки автомобилей*

Параметр парковки	Угол установки автомобиля относительно бордюра, °				
	0°	60°	45°	30°	90°
Плотность авт./м	0,13	0,19	0,27	0,32	0,36
Ширина парковки, м	2,76	4,15	4,98	5,49	5,50

При оценке преимуществ и недостатков схем парковки автомобилей учитывались особенности УДС: невозможность парковки в несколько рядов, значительная ширина тротуаров, дефицит зеленых насаждений города, удобство въезда и выезда с парковочного места<sup>2</sup> [4—7].

Схема парковки перпендикулярно к бордюру (рис. 4) характеризуется наибольшей плотностью 0,36 авт./м. Минимальная ширина парковки составляет 5,50 м, радиус выезда — 8,5 м. К достоинствам можно отнести высокую плотность парковки, что позволяет обустраивать емкие парковочные карманы. Однако стоит отметить, что значительная ширина кармана не позволяет использовать такую схему там, где нет значительных запасов площадей. Из-за ограниченности обзора существуют сложности при выезде с парковочного места. Большой радиус выезда создает сложности для проезжающих автомобилей. Данная схема подходит для централизованных парковок, а также дорог с минимальным уровнем загрузки движением и широкой проезжей частью.

Схема парковки под углом 30° (рис. 5) характеризуется плотностью парковки, составляющей 0,32 авт./м и шириной парковочного кармана в 5,49 м. К преимуществам можно отнести удобство выезда с парковочного места по

<sup>2</sup> СП 113.13330.2012 Стоянки автомобилей. Актуализированная редакция СНиП 21-02-99 [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200092706>;

МГСН 1.01—97. Московские городские строительные нормы. Временные нормы и правила проектирования планировки и застройки г. Москвы : утв. постановлением Правительства г. Москвы от 12.08.97 № 592. Ч. 1. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.docload.ru/Basesdoc/6/6677/index.htm>;

Пособие к МГСН 5.01—94. Стоянки легковых автомобилей / МАРХИ. Вып. 1. 1997. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gosthelp.ru/text/PosobieKMGSN50194PosobieK.html>;

Парковки и паркинги. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.stroyka.ru/Materials/37/329485/parkovki-i-parkingi/>;

СНиП 21-02—99\*. Стоянки автомобилей. Переизд. СНиП 21-02—99 с изм. № 1 ; введ. 2000-07-01. М. : ФГУП ЦПП, 2004;

СНиП 2.07.01—89\*. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений / ЦНИИП градостроительства. М. : ГУП ЦПП, 1994.

СНиП 2.07.01—89\* (2000). Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений / ЦНИИП градостроительства. М. : ГУП ЦПП. ГОССТРОЙ РОССИИ, 2000;

СП 42.13330.2011. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01—89\*. Москва : ОАО «ЦПП», 2011.

сравнению с перпендикулярной парковкой. Недостатком является значительная ширина парковки и неудобство выезда с парковочного места из-за ограниченного обзора с водительского места.

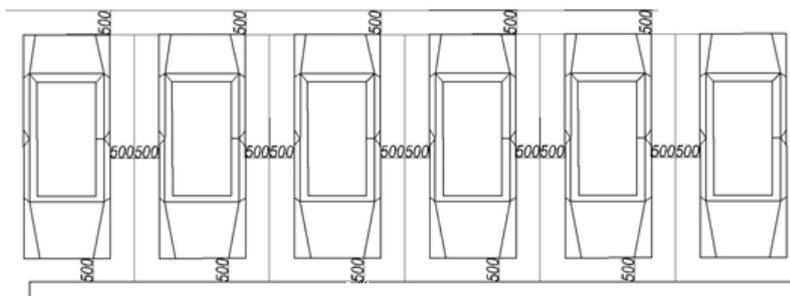


Рис. 4. Парковка перпендикулярно бордюру

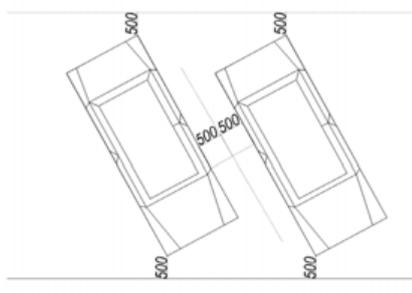


Рис. 5. Парковка под углом 30°

Схема парковки под углом 45° (рис. 6) характеризуется плотностью парковки в 0,27 авт./м и шириной парковки 4,98 м. Эта схема является оптимальной с точки зрения соотношения ширины кармана и плотности парковки. Стоит отметить удобство въезда на парковочное места из-за уменьшенного радиуса парковки и удобного обзора с водительского места. Доступ к багажному отделению не ограничивается проезжающими автомобилями и не создает аварийную ситуацию.

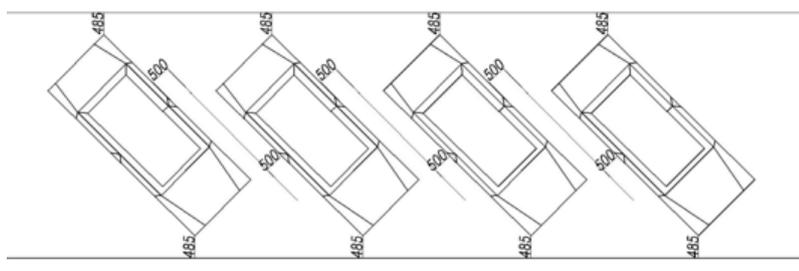


Рис. 6. Парковка под углом 45°

Схема парковки под углом  $60^\circ$  (рис. 7) характеризуется плотностью парковки 0,19 авт./м и шириной парковки 4,15 м. Достоинством является удобство въезда и выезда с парковочного места, свободный доступ к багажному отделению. Стоит отметить небольшую ширину парковочного места. Однако данная схема не позволяет создавать емкие парковочные карманы.

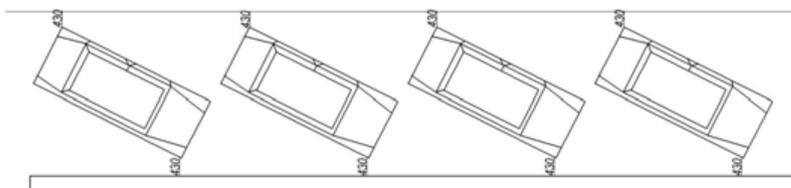


Рис. 7. Парковка под углом  $60^\circ$

Параллельная парковка (рис. 8) характеризуется минимальной плотностью — 0,13 авт./м и минимальной шириной парковки — 2,76 м. Достоинством является удобство выезда с парковочного места. Однако низкая плотность парковки не позволяет устраивать емкие парковочные карманы. Помимо этого существует трудность доступа к автомобилю со стороны проезжей части из-за проезжающих в непосредственной близости автомобилей.

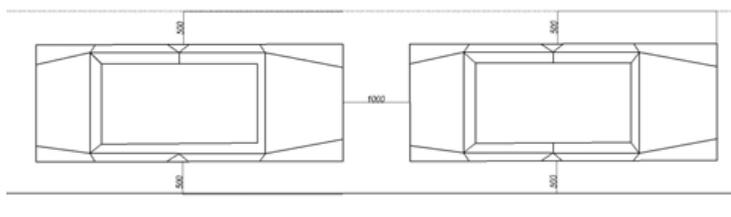


Рис. 8. Параллельная парковка

Альтернативой параллельной парковке является парковка с заездом на тротуар (рис. 9). Плотность остается аналогичной параллельной парковке. Однако необходимо устройство укрепительной полосы шириной до 0,5 м с целью предотвращения разрушения тротуара. Стоит отметить трудность контроля за полосой заезда автомобиля: автомобилист индивидуально выбирает ширину, на которую он паркует свое транспортное средство. Существует неудобство для проходящих в непосредственной близости от автомобиля пешеходов.

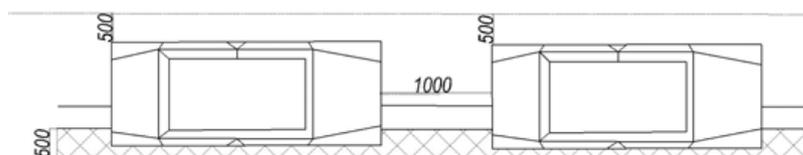


Рис. 9. Парковка с заездом на тротуар

Парковка в зоне зеленых насаждений нашла широкое применение в Европе (рис. 10).



Рис. 10. Парковка с сохранением зеленых насаждений в Германии

Парковочное место вписывают в свободную площадь между деревьями, стараясь максимально сохранить насаждения (рис. 11). Подобные схемы парковки в Волгограде применяются ограниченно.

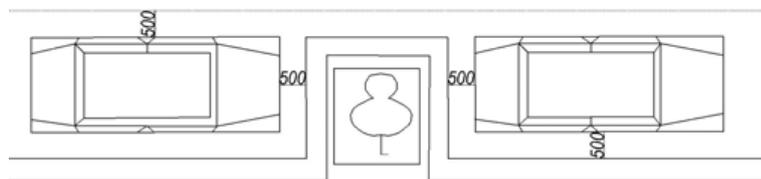


Рис. 11. Схема парковки с сохранением зеленых насаждений

В условиях дефицита свободной придорожной территории вдоль основных магистралей г. Волгограда для размещения автопарковок целесообразно использовать второстепенные поперечные и продольные (дублирующие) направления. При организации одностороннего движения транспорта по дорогам районного и местного значения с минимум левосторонних поворотов появляется возможность использовать одну полосу движения для парковки автомобилей [8].

По заданию Администрации Ворошиловского района разработаны проектные предложения по организации одностороннего движения и устройству автомобильных парковок на проезжей части улично-дорожной сети от ул. Калинина до ул. Баррикадной. Одностороннее движения транспорта, параллельно ул. Рабоче-Крестьянской, организовано по ул. Козловской (в направлении ул. Баррикадной) и по ул. Циолковского (в направлении ул. Калинина). Двухстороннее движения транспорта в поперечных направлениях предусмотрено по ул. Баррикадной, Огарева, Профсоюзной. В районе станции

скоростного трамвая «Ельшанка» рассмотрен вариант строительства крупной перехватывающей парковки на 560 машино-мест. Общая емкость парковок при различной схеме установки автомобилей составляет 1197 мест.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Руководство по проектированию городских улиц и дорог. М.: Стройиздат, 1980.
2. Состояние организации перевозок пассажиров общественным транспортом в малых городах, на примере городов Ахтубинска и Дубовки / А. В. Куликов, С. Ю. Фирсова, А. Н. Карагодина, Р. Я. Кашманов // Современные направления теоретических и прикладных исследований 2015 : матер. Интернет-конф., Украина, 17—29 марта 2015 г. Секция «Транспорт», подсекция «Автомобильные перевозки». URL: <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/transportation-115/trucking-115/24618-115-059>.
3. *Водолажский И. С., Гудков В. А., Куликов А. В.* Анализ состояния городского общественного пассажирского транспорта в Волгограде // Тезисы докладов смотра-конкурса научных, конструкторских и технологических работ студентов Волгоградского гос. технического университета, 14—17 мая 2013 г. / ВолгГТУ, Совет СНТО. Волгоград, 2013. С. 120—121.
4. *Сильянов В. В.* Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц: учебник для вузов. М., 2008. 123 с.
5. *Немчинов М. В., Рудакова В. В.* Строительство городских улиц и дорог. Ч. 2. М.: Экон-Информ, 2010. 330 с.
6. Методические рекомендации по проектированию площадок для стоянок автомобилей и автобусных остановок / СоюздорНИИ. М., 2008. URL: [http://snipov.net/c\\_4676\\_snip\\_111100.html](http://snipov.net/c_4676_snip_111100.html)
7. Направления развития автомобильного транспорта Волгоградской области / В. А. Гудков, А. В. Вельможин, В. С. Поленичкин, А. В. Куликов // Повышение эффективности эксплуатации транспорта: межвуз. науч. сб. Саратов, 2001. С. 126—129.
8. *Turner D.* Red Routes and Parking // Parking News. 1999. April. P. 16—19.

© *Алексиков С. В., Болдин А. И., Санжапов Б. Х., 2016*

Поступила в редакцию  
в декабре 2015 г.

Ссылка для цитирования:

*Алексиков С. В., Болдин А. И., Санжапов Б. Х.* Проектирование автомобильных парковок на автомагистралях Волгограда // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 253—260.

Об авторах:

**Алексиков Сергей Васильевич** — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [al34rus@mail.ru](mailto:al34rus@mail.ru)

**Болдин Александр Игоревич** — аспирант кафедры строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

**Санжапов Булат Хизбуллович** — д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой математики и информационных технологий, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

**S. V. Aleksikov, A. I. Boldin, B. Kh. Sanzhpov**

#### DESIGN OF CAR PARKS ON MOTORWAYS IN VOLGOGRAD

The authors describe the technical characteristics of car parks in the city streets.

К e y w o r d s: roads, car parks, cars.

REFERENCES

1. *Rukovodstvo po proektirovaniyu gorodskikh ulits i dorog* [The design manual for urban streets and roads]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1980.
2. Kulikov A.V., Firsova S. Yu., Karagodina A. N., Kashmanov R. Ya. [State organization of transportation of passengers in public transport in towns, on the example of cities Akhtubinsk and Dubovki]. *Sovremennye napravleniya teoreticheskikh i prikladnykh issledovaniy 2015 : mater. Internet-konf., Ukraina, 17—29 marta 2015 g.* [Modern tendencies in theoretical and applied researches 2015. Proc. of the Int. Conf., Ukraine, 17—29 March, 2015]. Access: <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/transportation-115/trucking-115/24618-115-059>.
3. Vodolazhskii I. S., Gudkov V. A., Kulikov A. V. [Analysis of the state of city public passenger transport in Volgograd]. *Tezisy докладov smotra-konkursa nauchnykh, konstruktorskikh i tekhnologicheskikh rabot studentov Volgogradskogo gos. tekhnicheskogo universiteta, 14—17 maya 2013 g.* [Theses of reports of a review competition of scientific, design and technological works by the students of Volgograd State Technical University, 14—17 May, 2013]. Volgograd, 2013. Pp. 120—121.
4. Sil'yanov V. V. *Transportno-ekspluatatsionnye kachestva avtomobil'nykh dorog i gorodskikh ulits: uchebnyk dlya vuzov* [Transport and performance characteristics of highways and city streets: textbook for higher education institutions]. Moscow, 2008. 123 p.
5. Nemchinov M. V., Rudakova V. V. *Stroitel'stvo gorodskikh ulits i dorog. Ch. 2* [Construction of city streets and roads. Part. 2]. Moscow, Ekon-Inform Publ., 2010. 330 p.
6. *Metodicheskie rekomendatsii po proektirovaniyu ploshchadok dlya stoyanok avtomobilei i avtobusnykh ostanovok* [Methodological recommendations on design of parking facilities and bus-stops]. Moscow, 2008. URL: [http://snipov.net/c\\_4676\\_snip\\_111100.html](http://snipov.net/c_4676_snip_111100.html)
7. Gudkov V. A., Vel'mozhin A. V., Polenichkin V. S., Kulikov A. V. [Tendencies of development of automobile transport in Volgograd Oblast]. *Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii transporta: Mezhevuz. nauch. sb.* [Increase of efficiency of vehicle operation: Interacademic sc. set.] Saratov, 2001. Pp. 126—129.
8. Turner D. Red Routes and Parking. *Parking News*, 1999. April. Pp. 16—19.

*For citation:*

Aleksikov S. V., Boldin A. I., Sanzhapov B. Kh. [Design of car parks on motorways in Volgograd]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 253—260.

*About authors:*

**Aleksikov Sergei Vasil'evich** — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Construction and Operation of Transport Works Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [al34rus@mail.ru](mailto:al34rus@mail.ru)

**Boldin Aleksandr Igorevich** — Postgraduate student of Construction and Operation of Transport Works Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

**Sanzhapov Bulat Khizbullovich** — Doctor of Physics and Mathematics Science, Professor, the Head of Mathematic and Information Technology Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

УДК 625.72

**С. В. Алексиков, А. И. Болдин, В. А. Пшеничкина**

*Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Описаны технические решения по осушению земляного полотна.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога, земляное полотно, влажность грунтов.

Прочность дорожных одежд и эксплуатационное состояние проезжей части в значительной мере зависит от несущей способности грунтового основания. Анализ более 80 проектных конструкций автодорог Нижнего Поволжья показал, что прочность дорожной одежды существенно зависит от сдвиговой прочности рабочего слоя полотна [1—4]. Запас проектной прочности конструкций по сдвигу в грунтовом основании составляет всего 3...6 % (рис. 1).

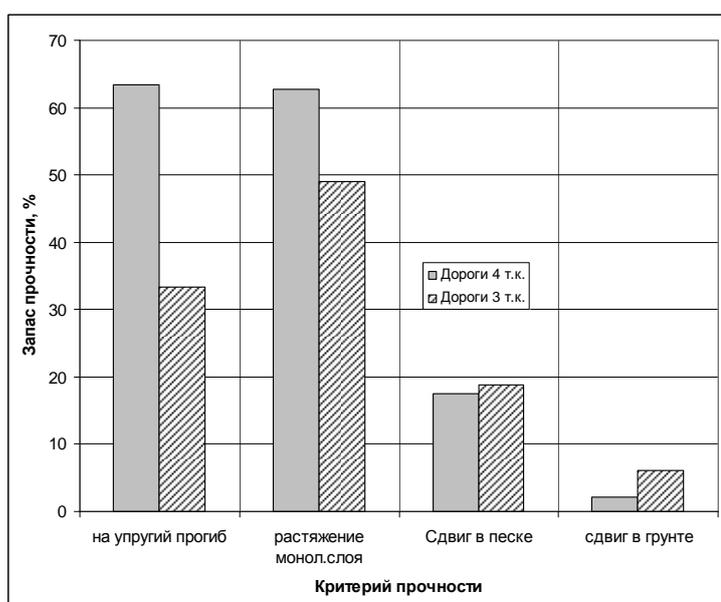


Рис. 1. Оценка запаса прочности дорожных одежд нежесткого типа

Просчеты проектировщиков в оценке источников увлажнения земляного полотна приводят к чрезмерному повышению влажности насыпей в после-строительный период, снижению прочности грунтового основания и разрушению дорожной одежды. Зачастую это связано с некачественными инженерно-геологическими изысканиями, недостаточным учетом хозяйственной деятельности на прилегающей территории, изменением условий стока поверхностных или грунтовых вод, просчетами в определении расчетной влажности и прочности земляного полотна, нарушениями при выполнении дорожно-строительных работ. В результате в первые годы эксплуатации дороги

на проезжей части появляются просадки и колеи, свидетельствующие о недостаточной прочности дорожной конструкции. Перед подрядными организациями возникает задача осушения земляного полотна в минимальные сроки с наименьшими затратами без перерывов в движении транзитного автотранспорта.

Известны инженерные решения по снижению влажности эксплуатируемых насыпей железных и автомобильных дорог<sup>1</sup> (табл. 1) [5—10].

Т а б л и ц а 1

*Мероприятия по осушению земляного полотна [6]*

Источники переувлажнения	Условия эксплуатации дороги	Мероприятия
Атмосферные осадки, поступающие через покрытие и обочины при их неудовлетворительном состоянии	Отсутствие дренирующих слоев дорожной одежды, устройств по отводу воды из слоев дорожной одежды из зернистых материалов, выход из дренирующих слоев и устройств закрыт глинистым грунтом. Поверхностные воды находятся на безопасном расстоянии от бровки насыпи. Подземные воды залегают на безопасной глубине	Ремонт покрытия, планировка и гидроизоляция обочин; отвод воды из слоев дорожной одежды из зернистых материалов
Вода, перемещающаяся в дренирующем слое с верховой стороны	Места вогнутых переломов профиля на участках с затяжными продольными уклонами (более 30 ‰). Поверхностные воды находятся на безопасном расстоянии от бровки насыпи. Подземные воды залегают на безопасной глубине	Поперечный дренаж мелкого заложения; поперечный трубчатый дренаж; поперечный трубчатый дренаж совместно с продольными трубчатыми дренами
Поверхностная вода на участках местности с необеспеченным стоком	Расстояние от подошвы насыпи до уреза поверхностной воды менее безопасной. Уклон кюветов в выемках менее 20 ‰. Отсутствует перемещение воды в дренирующем слое с верховой стороны. Подземные воды залегают на безопасной глубине	Профилирование и ремонт кюветов; уполаживание откосов насыпи; устройство берм; устройство в подошве насыпи экрана из водонепроницаемого грунта; повышение высоты насыпи; устройство дренирующего слоя; устройство гидроизолирующей или капиллярпрерывающей прослойки
Подземные воды (верховодка или грунтовые воды)	Расстояние от низа дорожной одежды до уровня подземных вод менее безопасной глубины. Отсутствует перемещение воды в дренирующем слое с верховой стороны. Поверхностные воды находятся на безопасном расстоянии от бровки насыпи.	Устройство траншейного дренажа (подкюветного или прикромочного); повышение высоты насыпи; устройство дренирующего слоя; устройство гидроизолирующей и капиллярпрерывающей прослоек;

<sup>1</sup> СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85\*.

В условиях длительного подтапливания земляного полотна поверхностными водами эффективно уполаживание откосов низких насыпей (до 1,5 м) или устройства бермы (рис. 2, 3).

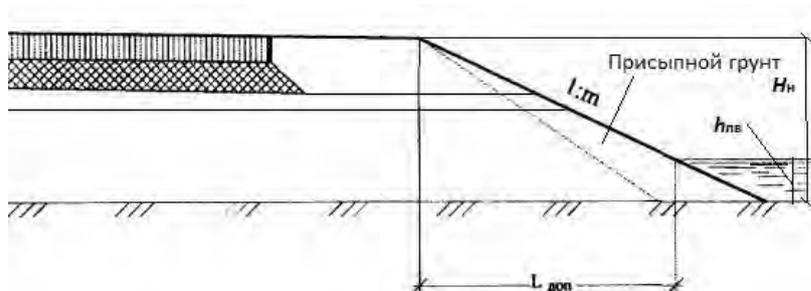


Рис. 2. Уполаживание откосов подтапливаемой насыпи

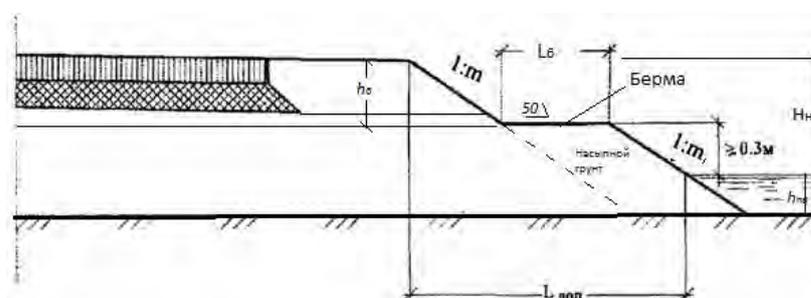


Рис. 3. Подтапливаемая насыпь с грунтовой бермой

Для ускорения отвода воды из основания дорожной одежды на обочинах дорожного полотна устраиваются поперечные дренажные прорезы на толщину дорожной одежды [5—7, 11]. Засыпка прорезей выполняется песком, песчано-гравийной смесью, щебнем (рис. 4). Дренаж устраивается с поперечным уклоном не менее уклона подстилающего слоя дорожной одежды ( $>30\%$ ).

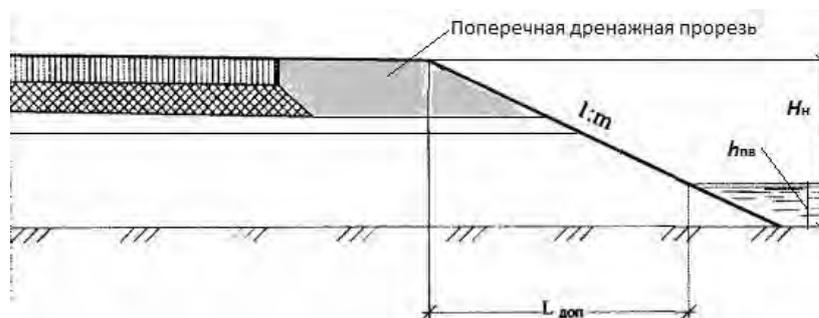


Рис. 4. Земляное полотно с поперечной дренажной прорезью

Уполаживание откоса насыпи присыпной грунтовой призмой из грунта, аналогичного насыпи, выполняется с заложением  $m$ :

$$m = \frac{L_{\text{доп}}}{(H_{\text{н}} - h_{\text{пв}})},$$

где  $H_{\text{н}}$  — высота насыпи, м;  $h_{\text{пв}}$  — глубина подпора насыпи водой, м;  $L_{\text{доп}}$  — допустимое расстояние от уреза воды до бровки насыпи.

Берма устанавливается не выше отметки выхода дренажного слоя дорожной одежды на откос (см. рис. 3) с поперечным уклоном от насыпи 50 %. Ширина бермы  $L_{\text{б}}$  рассчитывается по формуле

$$L_{\text{б}} = L_{\text{доп}} - mh_{\text{б}} - m_1(H_{\text{н}} - h_{\text{б}}),$$

где  $m$ ,  $m_1$  — заложение откосов насыпи и бермы;  $h_{\text{б}}$  — расстояние от бровки насыпи до бермы, м.

Минимально допустимое расстояние от уреза воды до бровки насыпи  $L_{\text{доп}}$  определяется условием обеспечения влажности земляного полотна не более расчетной по формуле

$$L_{\text{доп}} = 1,15 \left[ \frac{K_{\text{ф}} \rho_{\text{в}}}{(W_{\text{пв}} - W_{\text{о}}) \rho_{\text{ск}}} \right]^{3/8} t^{1/2},$$

где  $K_{\text{ф}}$  — коэффициент фильтрации грунта насыпи и насыпной призмы;  $\rho_{\text{в}}$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $W_{\text{пв}}$  — полная влагоемкость грунта, доли единицы;  $W_{\text{о}}$  — оптимальная влажность грунта, доли единицы;  $t$  — продолжительность стояния воды на поверхности земли в течение года, сут.

Ориентировочно значение  $K_{\text{ф}}$  можно принимать по табл. 2. Основные физико-механические свойства глинистых грунтов приведены в табл. 3.

Таблица 2

Коэффициенты фильтрации глинистых грунтов

Наименование грунта	Коэффициент фильтрации $K_{\text{ф}}$ , м/сут
Супесь	0,70...0,20
Суглинок	0,40...0,005
Глина легкая песчанистая	0,005
Глина пылеватая	$9 \times 10^{-6}$
Глина тяжелая	$5 \times 10^{-7}$

Для уменьшения  $L_{\text{доп}}$  и снижения объемов земляных работ, устройства присыпной призмы (см. рис. 3) или бермы целесообразно применение глин или суглинка тяжелого, характеризующихся низким коэффициентом фильтрации 0,005 м/сут. В случае существенной разницы фильтрационных свойств грунтов насыпи и бермы (призмы) минимально допустимое расстояние можно рассчитать по формуле

$$L_{\text{доп}} = 1,818 \bar{K}_{\text{ф}}^{0,365} \sqrt{t},$$

где  $\bar{K}_{\text{ф}}$  — средневзвешенный коэффициент фильтрации грунтов насыпи и бермы (призмы).

Т а б л и ц а 3

Основные физико-механические свойства грунтов (извлечение из [6])

Вид грунта	Разновидность	Плотность минеральной части, г/м <sup>3</sup>	Оптимальная влажность, W <sub>o</sub>	Максимальная плотность скелета грунта, г/м <sup>3</sup>
Супесь	Легкая крупная	2,66	9...15	2,0
	Легкая	2,68	9...15	1,8
	Пылеватая	2,68	12...17	1,7
	Тяжелая пылеватая	2,70	12...17	1,7
Суглинок	Легкий	2,70	14...20	1,8
	Легкий пылеватый	2,67	14...20	1,6
	Тяжелый	2,71	16...23	1,6
	Тяжелый пылеватый	2,72	16...23	1,5
Глина	Песчаная	2,71	23...30	<1,5
	Пылеватая	2,73	23...30	<1,5
	Жирная	2,74	>30	<1,5

Расчеты для супесчаного грунта показывают, что расстояние  $L_{доп}$  возрастает от 5,5 до 13 м с повышением коэффициента фильтрации от 0,52 до 0,7 м/сут и продолжительности подтапливания от 30 до 70 сут (рис. 5). Для суглинка легкого расстояние  $L_{доп}$  изменяется от 4,3 до 11,0 м с увеличением коэффициента фильтрации от 0,1 до 0,4 м/сут и продолжительности подтапливания от 30 до 70 сут (рис. 6). Для суглинка тяжелого пылеватого и песчаного  $L_{доп} = 4...5$  м, для глин  $L_{доп} = 2...4$  м.

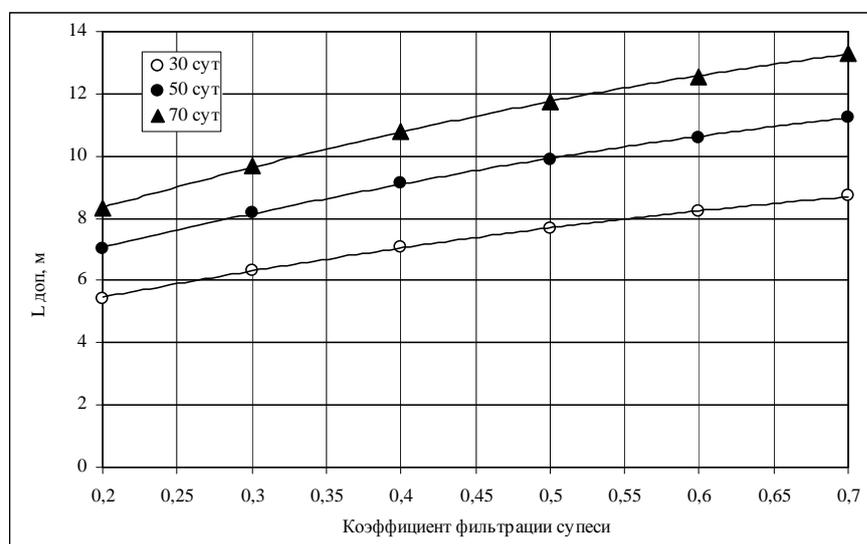


Рис. 5. Зависимость расстояния  $L_{доп}$  от коэффициента фильтрации супеси при продолжительности подтапливания от 30 до 70 сут

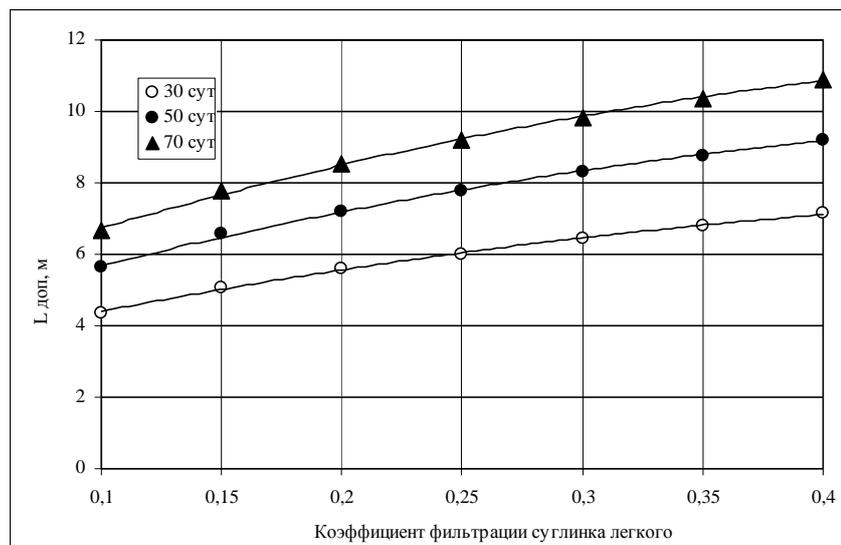


Рис. 6. Зависимость расстояния  $L_{доп}$  от коэффициента фильтрации суглинка легкого при продолжительности подтапливания от 30 до 70 сут

Для укрепления откосов грунтовой призмы возможно использование суглинка тяжелого, глины, бетонной плитки, монолитного бетона и т. п., что снижает фильтрацию влаги в тело земляного полотна и препятствует размыву подтапливаемой части насыпи (рис. 7). Материал укрепления определяется скоростью водного потока [2, 5]. Одним из вариантов снижения влажности рабочего слоя насыпи является устройство защитного экрана из тяжелых глинистых грунтов (рис. 8).

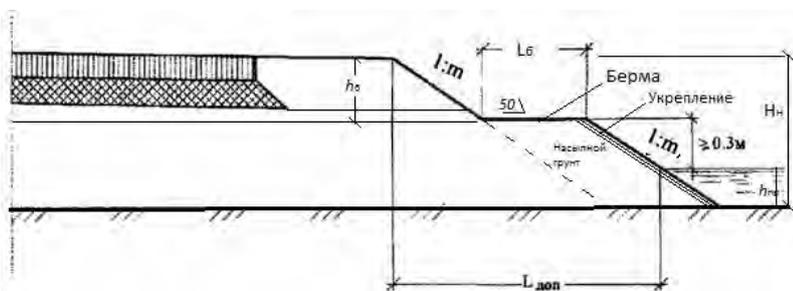


Рис. 7. Подтапливаемая насыпь с укрепленной бермой

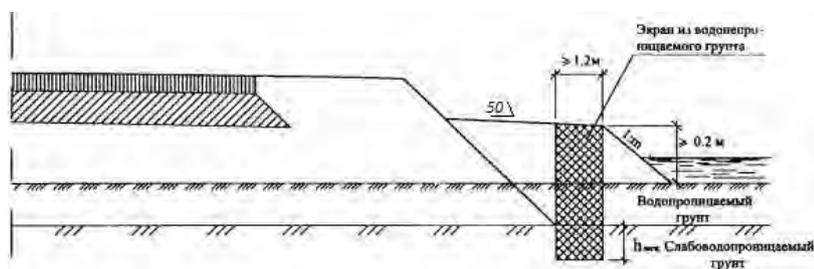


Рис. 8. Подтапливаемая насыпь с защитным экраном

Экран следует устраивать из глины тяжелой с числом пластичности более 27. Минимальное возвышение верха экрана принимается 0,2 м от постоянного уровня поверхностных вод. Величина заглубления экрана в слабопроницаемый грунт принимается по табл. 4.

Т а б л и ц а 4

*Минимальное заглубление экрана в слабопроницаемый грунт [6]*

Наименование слабопроницаемых грунтов	Минимальная величина заглубления экрана ( $h_{\text{загл}}$ ) в слабопроницаемый грунт при числе пластичности		
	12,1...14,0	14,1...17,0	17,1...27,0
Тяжелые суглинки и глины	3,5	2,5	2
$h_{\text{загл}}$ , м			

Приведенные конструкции насыпей позволяют существенно снизить влажность земляного полотна в течение 2—3 месяцев без существенной перестройки участка дороги, что является важным в условиях гарантийных обязательств подрядчика.

Практическая реализация рассмотренных конструкций насыпи выполнена на участке дороги «Подъезд от автомобильной дороги «Самойловка (Саратовская область) — Елань — Преображенская — Новоаннинский — Алексеевская — Кругловка — Шумилинская (Ростовская область)» к с. Родинское» с ПК41+00 по ПК55+00, построенном в 2013 г. В результате просчетов в проекте после строительства дороги изменились условия поверхностного стока на прилегающей местности. В кюветах наблюдается застой поверхностных вод. Земляное полотно эксплуатируется в условиях постоянного увлажнения. Фактическая влажность грунтов земляного полотна превысила расчетную (ОДН 218.046—01) в 1,23...1,29 раза. Из-за чрезмерного увлажнения рабочего слоя насыпи в последующие 3—4 месяца эксплуатации на проезжей части появились просадки, колейность. Осушение насыпи поперечными дренажными прорезями из щебня позволило стабилизировать земляное полотно в течение четырех месяцев летнего периода (рис. 9).



Рис. 9. Поперечная дренажная прорезь на участке избыточного увлажнения насыпи

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Руководство по проектированию городских улиц и дорог. М.: Стройиздат, 1980.
2. Рекомендации по осушению дорожных одежд и верхней части земляного полотна автомобильных дорог. М., 1970.
3. *Tanchaisawat T., Bergado D. T., Voottipruex P.* Numerical simulation and sensitivity analyses of full-scale test embankment with reinforced lightweight geomaterials on soft Bangkok clay // *Geotextiles and Geomembranes*. 2008. Vol. 26. Iss. 6. Pp. 498—511. doi: 10.1016/j.geotexmem.2008.05.005
4. *Brandl H., Adam D.* Special applications of geosynthetics in geotechnical engineering // *Proceeding of the Second European Geosynthetics Conference*. Bologna, Italy, 2000. Vol. 2. Pp. 27—64.
5. Методические рекомендации по осушению земляного полотна и оснований дорожных одежд в районах избыточного увлажнения и сезонного промерзания грунтов. М.: Союздорнии, 1974. URL: [http://www.znaytovar.ru/gost/2/Metodicheskie\\_rekomendaciiMeto73.html](http://www.znaytovar.ru/gost/2/Metodicheskie_rekomendaciiMeto73.html)
6. *Сиденко В. М.* Расчет и регулирование водно-теплого режима дорожных одежд и земляного полотна. М.: Автотрансиздат, 1962. 152 с.
7. *Сиденко В. М., Михович С. И.* Эксплуатация автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1976. 288 с.
8. *Сиденков В. М., Батраков О. Т., Покутнев Ю. А.* Дорожные одежды с парогидроизоляционными слоями. М.: Транспорт, 1894. 144 с.
9. *Рувинский В. И.* Оптимальные конструкции земляного полотна (на основе регулирования водно-теплого режима). М.: Транспорт, 1982. 166 с.
10. Руководство по сооружению земляного полотна автомобильных дорог / Минтрансстрой СССР. М.: Транспорт, 1982. 160 с.

© Алексиков С. В., Болдин А. И., Пшеничкина В. А., 2016

Поступила в редакцию  
в декабре 2015 г.

Ссылка для цитирования:

*Алексиков С. В., Болдин А. И., Пшеничкина В. А.* Стабилизация эксплуатируемого земляного полотна // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 261—269.

Об авторах:

**Алексиков Сергей Васильевич** — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [al34rus@mail.ru](mailto:al34rus@mail.ru)

**Болдин Александр Игоревич** — аспирант кафедры строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

**Пшеничкина Валерия Александровна** — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [rap\\_hm@list.ru](mailto:rap_hm@list.ru)

**S. V. Aleksikov, A. I. Boldin, V. A. Pshenichkina**

**STABILIZATION OF OPERATED ROADBED**

The authors describe the technical solutions for the drainage of a roadbed.

**Key words:** road, roadbed, soil moisture.

REFERENCES

1. *Rukovodstvo po proektirovaniyu gorodskikh ulits i dorog* [The design manual for urban streets and roads]. Moscow, Stroizdat Publ., 1980.
2. *Rekomendatsii po osusheniyu dorozhnykh odezhd i verkhnei chasti zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog* [Recommendations on drainage of road pavement and the top part of a road bed of highways]. Moscow, 1970.

3. Tanchaisawat T., Bergado D. T., Voottipruex P. Numerical simulation and sensitivity analyses of full-scale test embankment with reinforced lightweight geomaterials on soft Bangkok clay. *Geotextiles and Geomembranes*, 2008, 26(6), pp. 498—511. doi: 10.1016/j.geotextmem.2008.05.005
4. Brandl H., Adam D. Special applications of geosynthetics in geotechnical engineering. *Proc. of the Second European Geosynthetics Conf. Bologna*, Italy, 2000. Vol. 2. Pp. 27—64.
5. *Metodicheskie rekomendatsii po osusheniyu zemlyanogo polotna i osnovanii dorozhnykh odezhd v raionakh izbytochnogo uvlazhneniya i sezonnogo promerzaniya gruntov* [Methodological recommendations on drainage of a road bed and foundations of road pavements in areas of excess moistening and seasonal soil freezing]. Moscow, Soyuzdornii, 1974. URL: [http://www.znaytovar.ru/gost/2/Metodicheskie\\_rekomendaciiMeto73.html](http://www.znaytovar.ru/gost/2/Metodicheskie_rekomendaciiMeto73.html)
6. Sidenko V. M. *Raschet i regulirovanie vodno-teplovogo rezhima dorozhnykh odezhd i zemlyanogo polotna* [Calculation and regulation of water and thermal conditions of road pavement and road bed]. Moscow, Avtotransizdat Publ., 1962. 152 p.
7. Sidenko V. M., Mikhovich S. I. *Ekspluatatsiya avtomobil'nykh dorog* [Highway operation]. Moscow, Transport Publ., 1976. 288 p.
8. Sidenkov V. M., Batrakov O. T., Pokutnev Yu. *Dorozhnye odezhdyy s parogidrozolyatsionnymi sloyami* [Road pavement with steam-hydro-insulating layers]. Moscow, Transport Publ., 1894. 144 p.
9. Ruvinskii V. I. *Optimal'nye konstruksii zemlyanogo polotna (na osnove regulirovaniya vodno-teplovogo rezhima)* [Optimum designs of a road bed (on the basis of regulation of water and thermal conditions)]. Moscow, Transport Publ., 1982. 166 p.
10. *Rukovodstvo po sooruzheniyu zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog* [Guideline for construction of a highway road bed]. Moscow, Transport Publ., 1982. 160 p.

*For citation:*

Aleksikov S. V., Boldin A. I., Pshenichkina V. A. [Stabilization of operated roadbed]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 261—269.

*About authors:*

**Aleksikov Sergei Vasil'evich** — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Construction and Operation of Transport Works Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, al34rus@mail.ru

**Boldin Aleksandr Igorevich** — Postgraduate student of Construction and Operation of Transport Works Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

**Pshenichkina Valeriya Aleksandrovna** — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Engineering Structures, Foundations and Safety of Constructions Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, rap\_hm@list.ru

УДК 510.67:519.766: 517:502

*Л. П. Харитонова, О. В. Бурлаченко*

*Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

**ПРОБЛЕМЫ И НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
МОДЕЛИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОЛИНГВИСТИЧЕСКОГО  
ПРОГРАММИРОВАНИЯ В ВЫСШЕЙ МАТЕМАТИКЕ,  
В ТОМ ЧИСЛЕ ПРИ РЕШЕНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

Рассматривается применение некоторых методов НЛП при преподавании курса высшей математики в вузе. Приведены конкретные примеры представления ряда форм определенным образом структурированной информации (схем визуализации) при изучении математического анализа, аппарат которого используется в том числе и для решения экологических задач. Указаны некоторые способы адаптации изучаемого материала для студентов с учетом репрезентативной системы восприятия и переработки информации (визуалов, аудиалов, кинестетиков).

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** некоторые техники НЛП, моделирование с помощью НЛП, высшая математика.

Достаточно часто, несмотря на успешную сдачу ЕГЭ, после поступления в высшее учебное заведение, где математика не является профильным предметом, у студентов (особенно на не самых престижных специальностях) возникают определенные проблемы при изучении высшей математики [1—8]. И попытки повторения изученного, но не всегда осознанно выученного за 10—11 лет, школьного курса в течение 10 ч нулевого семестра (хотя хорошо, что его ввели) часто вызывают у преподавателя затруднения. Кроме того, и у студента возникают проблемы: помимо понимания теоретического материала, умения решать задачи требуется и умение словесно сформулировать вопрос и ход своих действий. Сначала (в процессе обучения) — чтобы элементарно сформулировать вопрос о непонятном для него материале, а затем, после окончания обучения (особенно в случае инженера или магистра), — чтобы сформулировать техническую задачу как математическую перед специалистом-математиком при работе в команде (компании) при, например, разработке новой конструкции, процесса или для решения экологических задач.

Научить этому — одна из задач, стоящих перед преподавателем (и эта проблема, среди прочих, мотивирует студента к изучению предмета) [1—9]. Требуются разработки качественно новых методов изучения нового учебного материала для повышения эффективности обучения с учетом профессиональной направленности.

У разных типов личности существуют разные стратегии понимания, восприятия и запоминания. Известно, что преобладающими каналами восприятия информации могут быть:

визуальный (человек лучше воспринимается материал, когда он написан на доске, в книге или находится на мониторе, дополнен графиками, схемами);  
аудиальный (информация лучше воспринимается на слух).

Кинестетикам больше нравится писать, они любят ролевые игры.

Выделяют также логиков; представляется, что нельзя исключить и смешанный (полиmodalный) тип.

К сожалению, на выявление склонности студента к тому или иному способу усвоения нового материала при нынешнем сокращении числа аудиторных занятий у преподавателя не всегда хватает времени (да и сил), учитывая ничтожное количество часов на консультации (5 % от количества часов лекций) на группу в семестр. Особенно это актуально при нынешнем сокращении количества семестров изучения математики (у будущих бакалавров по направлению «Строительство») с четырех семестров (2 г. обучения) до двух семестров (1 г.).

В то же время в работе [10] делается вывод, что для получения хорошего результата при изучении иностранного языка в неязыковом вузе следует сжать обучение с двух до одного года с высокой интенсивностью занятий (по 8...10 ч в неделю) и избыточной подачей материала, направленной на все типы личности одновременно.

И если со вторым утверждением можно согласиться, то сокращение до одного года изучения высшей математики, как показывает опыт работы по новым учебным планам, трудно назвать целесообразным, особенно со слабоуспевающими студентами. Безусловно, полезным надо признать корректировку так называемых ограничивающих убеждений студентов. Например, плохая память часто объясняется неумением просто сосредоточиться или элементарной невнимательностью. Для улучшения памяти следует рекомендовать создание ассоциативных связей — мнемотехнику, а также применение законов запоминания: впечатление, повторение, ассоциации [10]. Эту работу следует надо пытаться сделать лично-ориентированной. Но, мотивация крайне важна — как основа для изучения общетехнических и специальных дисциплин [1—3,8].

Представляется целесообразным попытаться применить методы нейролингвистического программирования (НЛП) в обучении.

НЛП — это методология, которая, как и математика, может быть применена в самых различных областях. Не случайно к основателям НЛП относят лингвиста Джона Гриндера (PhD) и психолога и математика Ричарда Бэндлера (также PhD).

Нейролингвистическое программирование достаточно распространено во многих развитых странах. Например, в США и Германии свыше 170 центров и институтов НЛП, которые исследуют его применение в разнообразных областях. В Российской Федерации НЛП, как правило, изучается на уровне спецкурсов во многих крупнейших университетах. Например, в Институте повышения квалификации Российского университета дружбы народов (ИППК РУДН) выполняется профессиональная переподготовка специалистов по программам дополнительного профессионального образования, и в программе обучения есть курс нейролингвистического программирования с выдачей выпускникам документа государственного образца. В МГУ им. Ломоносова на отделении филологического обеспечения связей с общественностью также предусматривается изучение нейролингвистического программирования. В Смоленском государственном университете предоставляется возможность изучения курса «Введение в НЛП (нейролингвистическое программирование)» и т. д.

Ценность и важность НЛП основана на том, что в нем в единую структуру сведены самые разные теории, в том числе принципы компьютерного моделирования и теории систем.

Можно сказать, что в основе НЛП лежат когнитивные науки [8]. Вопрос об устройстве и работе человеческого мозга, о том, что представляют собой мыслительные стратегии, решается путем предложения разных моделей функционирования мышления и памяти (синергетической, голографической и др.).

Количество публикаций по применению методов НЛП в образовании невелико [9—12]. А при изучении высшей математики — еще меньше [9]. В этой работе предлагается методика практических занятий и самостоятельной работы по курсу математического анализа, выполняемых в компьютерном классе вуза или дома за собственным компьютером с использованием компьютерного математического пакета MathCAD. Вначале задается общая для всех студентов последовательность действий. Затем каждому студенту выдаются задания на соответствующие темы для их реализации в MathCAD с учетом индивидуальной репрезентативной системы восприятия и переработки информации (но, к сожалению, не указывается как именно). Например, самостоятельная работа на иллюстрацию существенности условия о независимости выбора точек при составлении интегральных сумм. В другой самостоятельной работе «Площадь фигуры, ограниченной кривой, заданной параметрическими уравнениями. Площадь в полярных координатах» на основе графических возможностей пакета MathCAD выполняются работы с параметрически заданными функциями и функциями, заданными в полярных координатах. Сначала работа выполняется фронтально: т. е. ведется одна общая для всех последовательность действий. После этого каждый студент получает индивидуальные задания по технологии НЛП. В качестве индивидуальных предлагается выполнить творческие задания:

визуалам — разработка презентаций по темам: «Определенный интеграл и его свойства», «Приложения определенного интеграла» и «Приложения кратных и криволинейных интегралов»;

аудиалам (преподавателю предлагается произнести задание вслух) — объяснить алгоритм нахождения площади фигуры, ограниченной кривой, заданной параметрическими уравнениями;

кинестетикам — создать электронные таблицы по темам: «Методы интегрирования», «Определенный интеграл и его свойства», «Приложения определенного интеграла», «Приложения кратных и криволинейных интегралов».

К сожалению, в данной работе не указаны конкретные статистически обработанные результаты применения НЛП. Не вполне понятно, каким образом возможно (и возможно ли вообще) совмещение в течение одного занятия и создания электронных таблиц, и презентаций, и объяснение алгоритма нахождения площади фигуры, особенно со студентами первого курса и первого же семестра, еще не начавшим изучать курс информатики и не знакомыми с MathCAD (по новым учебным планам направления «Строительство»).

Но как быть, если изучение математического анализа проводится не в компьютерном зале, а, как в подавляющем числе случаев, в обычной аудитории с доской и преподавателем с мелом в руке? Преподаватель, конечно, напишет на доске формулы и построит графики для визуалов, пояснит словами написанное для аудиалов. Но как быть с кинестетиками, ориентированными на действие?

В работе [11] рассматривается использование элементов НЛП в преподавании спецкурса «Основы нанотехнологий». На основе знаний об основных

закономерностях человеческой памяти (оперативной, кратковременной и долговременной) процесс обучения происходит с опорой на прошлое и будущее. Схема визуализации имеет следующий вид:

ИУЭ ↔ ОУЭ ↔ БУЭ

и включает три тесно связанных и взаимообусловленных звена:

- 1) ИУЭ (набор ранее изученных известных учебных элементов);
- 2) ОУЭ (основные учебные элементы — главное содержание);
- 3) БУЭ (тот учебный материал, который предвосхищает часть будущего материала и только в дальнейшем будет основным).

Фоном для усвоения ОУЭ являются ИУЭ и БУЭ.

Суть этой схемы состоит в том, что обучаемый перемещает взгляд от одного элемента к другому, сравнивает, а возвращаясь от одного элемента к другому, их анализирует. Неоднократное повторение отдельных элементов позволяет, как указывают авторы [11], формировать целостную систему, которая спустя большой промежуток времени может быть быстро восстановлена в памяти.

Итак, из некоторых элементов визуальных средств образованы формы определенным образом структурированной информации. К сожалению, в работе [11] не указаны результаты практического применения и хотя бы один частный пример (в понятиях, формулах и т. д.) вышеуказанной схемы. Работа [11] направлена на студентов, имеющих визуальную систему представления.

В Санкт-Петербурге в 2014 г. в Военном институте (инженерно-техническом) военной академии материально-технического обеспечения им. Генерала армии А. В. Хрулева под руководством доктора наук, профессора Е. И. Чирковой на основе обобщения инновационного опыта использования нейролингвистического программирования в процессе профессиональной подготовки и переподготовки слушателей защищена кандидатская диссертация, посвященная использованию графических элементов и символов, которые рассматриваются как использование НЛП-графики. Работа выполнялась на базе учебных подразделений ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия (Военно-морской политехнический институт и Военный институт дополнительного образования)». Как показали эксперименты, НЛП-графика позволяет улучшить работу памяти, профессиональный уровень и повышает эффективность обучения слушателей военно-морских вузов при формировании у них профессиональной коммуникативной компетенции в области иноязычной письменной речи за счет экономии времени при повышении уровня знаний, улучшения внимания и мышления [12]. Кроме количественной оценки, отмечаются также качественные показатели: возрастающая потребность обучаемых в использовании приемов НЛП-графики для составления конспектов, схем и т. д.; снижение психологического барьера; положительная эмоциональная составляющая и мотивация к совершенствованию знаний. Все это позволяет удовлетворить как эмоциональные, так и интеллектуальные потребности студентов.

Аудиторных часов на одного студента (то есть количество часов, которое студент проводит в аудитории с преподавателем на лекциях и практических занятиях) выделяется все меньше, а аудиторная нагрузка на одного преподавателя растет в связи с сокращением или полной отменой часов на проверку

контрольных работ, типовых расчетов и т. д. по высшей математике. К сожалению, не всегда достаточно эффективно (или просто нет возможности) проводить эту работу при изучении математики или других близких к ней дисциплин (математической физики, тепломассообмена (в рамках курса теплотехники) и др.) с помощью компьютера [13—15]. Добросовестный преподаватель все равно выполнит эту работу, но за счет своего личного времени. Поэтому одна из целей применения НЛП в образовании — научить преподавателя воссоздавать ранее созданное ментальное состояние для сокращения времени и экономии сил, а не создавать его каждый раз заново. НЛП воспринимает субъективный опыт людей как имеющий структуру системный процесс. Поэтому становится возможным обобщение того, что часто называют талантом, интуицией.

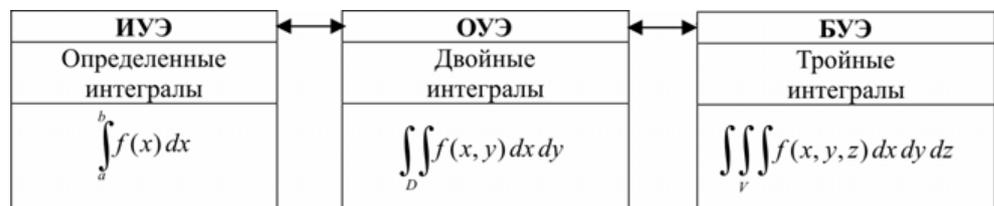
В НЛП изучаются в том числе внешние стимулы (их называют триггерами, запускающими условные и безусловные рефлексy). В НЛП этот процесс называют якорением.

Ряд преподавателей используют (осознанно или неосознанно) академические якоря. Новая формула пишется на доске, ее пояснение дается не у доски, а внутри аудитории. Например, прекрасный преподаватель профессор Я. Е. Жак иногда буквально перебежал в процессе вывода формулы от одной части доски к другой, заставляя студента, пытающегося понять и записать вывод формулы в свой конспект, постоянно следить за профессором. А при пояснении этой формулы профессор уходил в проход между партами. И студентам сразу было понятно, что это не новая теорема или определение, а пояснение ранее написанного.

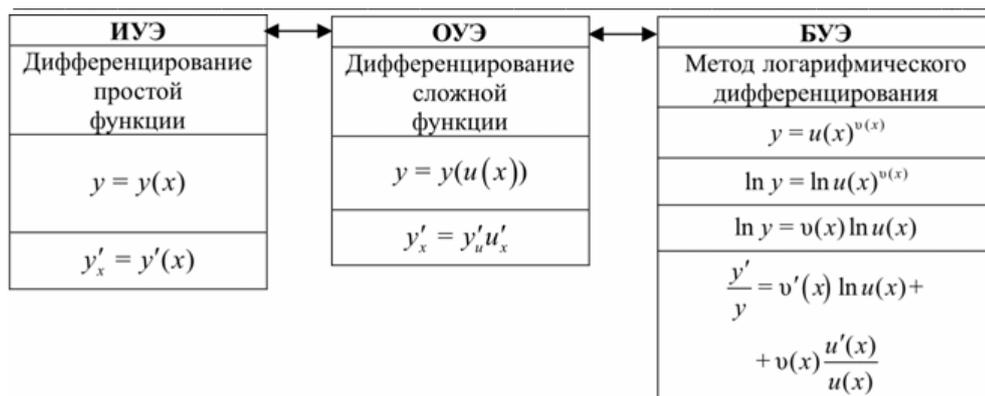
Молодому преподавателю можно посоветовать с целью развития аудиального канала использовать различную громкость голоса, величину паузы между словами, скорость произношения слов. Для развития визуального канала менять размеры, формы. Например, при изучении дискретной математики и операций над множествами [16] при интерпретации различных множеств диаграммами Эйлера — Венна заменять форму окружности на другую (треугольник или эллипс). Для развития кинестетики целесообразно использовать собственное движение.

При изучении различных разделов математического анализа [17, 18] (в широком смысле) нами предлагается рассмотреть следующие схемы визуализации:

1. При изучении интегрального исчисления:



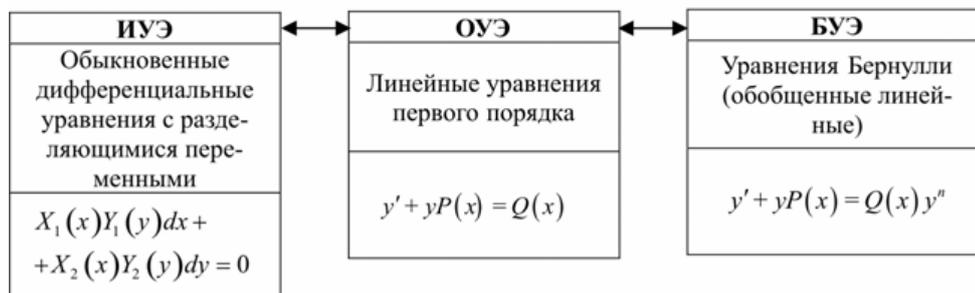
2. При изучении дифференциального исчисления функции одной переменной:



3. При изучении дифференциальных уравнений первого порядка:



или



Возможна разработка целых цепочек: те темы, которые на первом занятии являлись ОУЭ (основным учебным элементом, то есть главным содержанием), на втором занятии становятся уже ИУЭ (набором ранее изученных известных учебных элементов) и т. д.

Такие наборы форм определенным образом структурированной информации способствует формированию целостных систем различных разделов изучаемой дисциплины.

Группа состоит из нескольких человек с одной модальностью (хотя, как указывается в исследованиях психологов, обычно визуалов больше). Преподаватель должен адаптировать изучаемый материал для студентов с разными типами модальности. Поэтому целесообразно для студентов с разной модальностью после словесной формулировки теоремы или определения (для аудиалов) по возможности дать их геометрическую интерпретацию (для визуалов). А для ориентированных на действие кинестетиков — по возможности описать физический процесс, описываемый данной формулой.

Также крайне важна невербальная коммуникация в процессе обучения, так как невербальные сигналы оказывают более сильное влияние на людей, а невербальные отношения (в случае неэффективности словесного общения) позволяют выразить более сложные чувства и являются более искренними. Невербальный сигнал окажется более сильным в случае неконгруэнтности (несоответствия) между вербальным и невербальным сообщением. При этом правое полушарие головного мозга вовлечено в невербальные и пространственные процессы, а левое полушарие отвечает за вербальные сигналы и различные аналитические функции (по результатам неврологических исследований).

Перейдем теперь к моделированию в НЛП. Моделирование в НЛП, как указывает его автор Роберт Дилтс, один из самых эффективных на сегодня методов обучения обучению. Одним из результатов этих исследований стала в том числе компьютерная программа «Стратегия математики» (Math Strategy).

Роберт Дилтс приводит слова Томаса Джефферсона: «Если два человека при встрече обмениваются долларами, то у каждого из них останется по доллару. Если эти же люди при встрече обмениваются идеями, то у каждого останется две идеи» [18].

Эта цитата отражает потенциал моделирования. По сути, моделирование есть процесс обмена идеями, который открывает человеку много ранее недоступных возможностей. Моделирование обеспечивает одновременное достижение двух целей: человек, с одной стороны, выполняет частную конкретную задачу, а с другой, учится тому, каким образом это следует делать. При моделировании сложное явление или событие дробят на более мелкие составляющие элементы, которые обеспечивают воспроизведение или использование этого явления или события. Применение НЛП к образованию и обучению состоит в том, что передаются не истины, а модели, «снятые с наиболее талантливых людей, причем они формализованы таким образом, что могут с успехом использоваться в самых различных областях<sup>1</sup>.

Важным вопросом является сравнение результатов при обучении обычным методом и с применением методов НЛП. Какова объективность результатов? Это обычный вопрос при проведении педагогического эксперимента. Анализ экспериментальных данных следует проводить с использованием методов математической статистики. Для сравнения эффективности традиционных и новых методов обучения с использованием НЛП [18] были определены критерии, по которым производится оценка и сопоставление результатов, в частности коэффициент эффективности технологии на основе показателей памяти, внимания; уровня обученности, экономии времени, быстроты мышления, среднего уровня знаний для получения количественной оценки полученных экспериментальных данных и количественной же оценки качества предлагаемой технологии.

Например, для оценки эффективности можно принять предлагаемый в [12] коэффициент обученности, который мы предлагаем записать в виде

$$K_{об} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{pi \text{ ср.уз}}}{n},$$

<sup>1</sup> Михаил Гринфельд, <http://www.nlp.ru>

где  $\sum_{i=1}^n K_{pi \text{ ср.уз}}$  — сумма баллов, выполненных  $n$  разделов курса.

Если в работе [18] количество разделов равнялось  $n = 3$ , то нами предлагается количество разделов принять равным количеству дидактических единиц, которые содержатся в Федеральном Интернет-экзамене в сфере профессионального образования (ФЭПО) (например, в демоверсии).

Для обоснования вывода о статистической значимости полученных результатов можно считать целесообразным применение использованного в работе [12] непараметрического  $U$ -критерия Манна — Уитни. Этот статистический критерий применяется для оценки различий между независимыми выборками по уровню измеренного количественного признака. С помощью  $U$ -критерия Манна — Уитни сравниваются выборки малого объема (как правило, количество студентов в группах составляет обычно 15—25 чел.) и не требуется проверка на нормальность распределения. Можно сравнивать разные группы студентов, изучающих одну тему по разным методикам, как это делалось в работе [12]. Но в разных группах, как правило, студенты имеют разные уровни подготовки, способностей и типы модальности. Можно, конечно, сравнивать изучение разных тем в одной группе, но любому преподавателю известно, что разные темы усваиваются с разным успехом (сравните темы: метод разделения переменными в случае обыкновенных дифференциальных уравнений или в случае уравнений с частными производными; обыкновенные определенные интегралы или поверхностные). Этот вопрос требует дальнейшего исследования.

Для повышения качества учебного процесса представляется целесообразным адаптировать предлагаемые методы для изучения других дисциплин, в том числе строительного, экологического и архитектурного направлений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Харитонова Л. П. Об использовании элементов научных исследований процессов различной физической природы, в том числе по теории тепломассообмена и аэродинамики, при преподавании высшей математики // Известия ВГТУ. Новые образовательные системы и технологии обучения в вузе. Волгоград. 2013. Т. 10. № 13(116). С. 150—152.
2. Харитонова Л. П. К вопросу о решении некоторых проблем математической подготовки специалистов инженерно-технического профиля во вузе // Пятнадцатая международная науч. конф. им. академика Михаила Кравчука. Т. 4. Киев. Киев: [НТУУ "КПИ"], 2014. С. 192—193.
3. Харитонова Л. П. Концептуальные основы измерения и повышения уровня знаний и мотивационные аспекты при формировании профессионального мышления в высшей школе // Известия ВолгГТУ. № 8. (Сер. Новые образовательные системы и технологии обучения в вузе. Вып. 1). Волгоград, 2004. С. 84—86.
4. Харитонова Л. П. О решении ряда задач математических дисциплин во ВТУЗах, в том числе с использованием некоторых интерактивных образовательных технологий // Математика в современном техническом университете : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., (Киев, 25—26 дек. 2014 г.) = Математика в сучасному технічному університеті : матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 25—26 груд. 2014 р.). Киев: Изд-во НТУУ «КПИ», 2015. С. 368—371.
5. Харитонова Л. П. Интенсификация процесса и некоторые психологические аспекты преподавания математических дисциплин // Новые образовательные системы и технологии обучения в ВУЗе: межвузовский сб. науч. тр. Вып. 5. Ч. 2. Волгоград: ВГТУ, 1999. С. 87—90.
6. Харитонова Л. П. Проблемы и некоторые методы их решения при построении концепции математического образования в высшей школе // Вестник Волгоградской государственной архитектурно-строительной академии. Сер.: Естественные науки. 2002. Вып. 2(6). С. 226—230.

7. Харитонова Л. П. Совершенствование процесса преподавания математических дисциплин и их связь с общетехническими и специальными дисциплинами при многоуровневом образовании // Новые образовательные системы и технологии обучения в вузе. Волгоград, 1998. Вып. 4. Ч. 2. С. 117—121.

8. Харитонова Л. П. К вопросу об исследовании новых образовательных технологий для изучения курса высшей математики и других естественных наук в вузе // Наука и образование в XXI веке: сб. науч. трудов по матер. Междунар. науч.-практ. конф. Ч. VII. М.: АР-Консалт, 2014. С. 83—85.

9. Абдыкаримова А. Ж., Сеитова С. М. Эффективность организации самостоятельных работ по курсу математического анализа с использованием нейролингвистического программирования // Путь науки. Международный научный журнал. 2015. № 1(11).

10. Варенина Л. П. Интенсив и техники нейролингвистического программирования в обучении иностранным языкам в неязыковом вузе // Вестник Московского государственного гуманитарного университета им. М. А. Шолохова. Педагогика и психология. 2012. № 3. С. 35—38.

11. Применение НЛП в преподавании спецкурса «Основы нанотехнологий» / Ю. С. Нагорнов, А. Ю. Нагорнова, О. С. Погребная, О. С. Прилепских, С. А. Корнеева, Д. В. Кирюхина // Педагогические науки. 2013. № 3. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=8829>.

12. Тропкина Ю. В. Инновационный опыт обучения письменной речи в профессиональной подготовке и переподготовке слушателей военно-морских вузов: дисс... канд. пед. наук. Санкт-Петербург, 2014. 212 с.

13. Харитонова Л. П. (Haritonova L.P.) К вопросу о математическом моделировании тепломассообмена в устройствах, в том числе с импактным натеканием струй (To a question about the mathematical simulation of heat-mass transfer in the devices, including with the impact leakage of the jets) // Материалы Международной науч.-практ. конф. «Фундаментальная наука и технологии — перспективные разработки IV». Fundamental sciens and technology — promising developments IV. Vol. 2. USA : North Charleston, 2014. Pp. 176—180.

14. Haritonova L. P. On the problems of the solution of number of problems with a study of the processes of heat-mass transfer, including in the devices with the impact leakage of jets, with the use of freely extended software with the open initial code, in particular OPENFOAM // Материалы Международной науч.-практ. конф. «21 век: фундаментальная наука и технологии VII» (21 century: fundamental science and technology VII). Vol. 2. North Charleston. USA. 2015. Pp. 127—130.

15. Харитонова Л. П. О математическом моделировании процессов тепломассообмена в устройствах с импактным натеканием систем струй и ряде методов решения проблем при использовании при этом пакета FLUENT и свободно распространяемого программного обеспечения с открытым исходным кодом (в том числе OPEN FOAM) // International Scientific and Practical Conference "WORLD SCIENCE" (Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Modern Scientific Achievements and Their Practical Application (October 20—21, 2015, Dubai, UAE)"). 2015. № 3(3). Vol. 1. November. Pp. 54—56.

16. Избранные главы высшей математики. Элементы дискретной математики и случайных функций: учебное пособие / И. П. Руденок, Л. П. Харитонова, О. В. Рыбакова, Е. Г. Вишнякова. Волгоград: ВолгГАСУ, 2004. 107 с.

17. Болотина Н. Н., Харитонова Л. П., Руденок И. П. Высшая математика: учеб.-практ. пособие. Волгоград: ВолгГАСУ, 2012. 318 с.

18. Киреева А. И., Руденок И. П., Харитонова Л. П. Избранные разделы высшей математики: краткий теоретический курс для подготовки к федеральному Интернет-экзамену в сфере профессионального образования по дисциплине «Математика»: в 2 ч. Ч. 1. Волгоград: ВолгГАСУ, 2014. 199 с.

19. Дилтс Роберт. Моделирование с помощью НЛП. СПб.: Питер, 2000. 288 с.

© Харитонова Л. П., Бурлаченко О. В., 2016

Поступила в редакцию  
в ноябре 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Харитонова Л. П., Бурлаченко О. В. Проблемы и некоторые методы повышения эффективности моделирования с помощью нейролингвистического программирования в высшей математике, в том числе при решении экологических задач // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 43(62). С. 270—280.

Об авторах:

**Харитоновна Лариса Петровна** — канд. техн. наук, доц., Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, [haritonova410@yandex.ru](mailto:haritonova410@yandex.ru)

**Бурлаченко Олег Васильевич** — д-р техн. наук, проф., проректор по учебно-воспитательной работе, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, [oburlachenko@yandex.ru](mailto:oburlachenko@yandex.ru)

**L. P. Kharitonova, O. V. Burlachenko**

## PROBLEMS AND SOME METHODS OF INCREASING THE EFFICIENCY OF MODELLING USING NLP IN HIGHER MATHEMATICS, INCLUDING THE SOLUTION OF ECOLOGICAL TASKS

The application of some methods of NLP in the process of teaching higher mathematics in an Institution of Higher Education is examined in this article. The authors give certain examples of representation of some forms of specifically structured information (diagrams of visualization) during the study of mathematical analysis, the apparatus of which may be useful for the solution of ecological tasks. Some methods of adaptation of the studied material for students taking into account the representative system of perception and processing of information (visual, auditory, tactile learners) are indicated.

**К е y w o r d s:** some techniques of NLP, modeling with the help of NLP, higher mathematics.

### REFERENCES

1. Kharitonova L. P. [About the use of elements of scientific researches of processes of various physical nature, including by the theory of heat-and-mass transfer and aerodynamics, when teaching higher mathematics]. *Izvestiya VGTU. Novye obrazovatel'nye sistemy i tekhnologii obucheniya v vuze* [News of VSTU. New educational systems and training technologies in Institutions of Higher Education]. Volgograd, 2013. Vol. 10, no. 13(116), pp. 150—152.
2. Kharitonova L. P. [To the issue of solution of certain problems of mathematical training of specialists of engineering speciality in technical college]. *Pyatnadsataya mezhdunarodnaya nauch. konf. im. akademika Mikhaila Kravchuka. T. 4* [15<sup>th</sup> International Sc. Conf. Named after Mikhail Kravchuk. Vol. 4]. Kiev, [NTUU "KPI" Publ.], 2014. Pp. 192—193.
3. Kharitonova L. P. [Conceptual bases of measurement and increase of knowledge level and motivational aspects at formation of professional thinking at higher school]. *Izvestiya VolgGTU. № 8. (Ser. Novye obrazovatel'nye sistemy i tekhnologii obucheniya v vuze. Vyp. 1)* [News of VSTU. No. 8. (Series. New educational systems and training technologies in Institutions of Higher Education. Iss. 1)]. Volgograd, 2004. Pp. 84—86.
4. Kharitonova L. P. [About the solution of a number of mathematical problems in technical colleges, including those with the use of certain interactive training technologies]. *Matematika v sovremennom tekhnicheskoy universitete : materialy III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., (Kiev, 25—26 dek. 2014 g.)* [Mathematics at modern technical university: proceedings of III Intern. Sc.-Pract. Conf., (Kiev, 25—26 Dec., 2014)]. Kiev, NTUU "KPI" Publ., 2015. Pp. 368—371.
5. Kharitonova L. P. [Process intensification and certain psychological aspects of teaching mathematical disciplines]. *Novye obrazovatel'nye sistemy i tekhnologii obucheniya v VUZe: mezhdunarodnyy sb. nauch. tr. Vyp. 5. Ch. 2* [New educational systems and training technologies Institutions of Higher Education. Interacademic set of research papers. Iss. 5. Part. 2]. Volgograd, VSTU Publ., 1999. Pp. 87—90.
6. Kharitonova L. P. [Problems and certain methods of their solution when developing concept of mathematical education at higher school]. *Vestnik Volgogradskoy gosudarstvennoy arhitekturno-stroitel'noy akademii. Seriya: Estestvennyye nauki* [Bulletin of Volgograd State Academy of Architecture and Civil Engineering. Series: Natural Sciences], 2002, iss. 2(6), pp. 226—230.
7. Kharitonova L. P. [Improvement of the process of teaching of mathematical disciplines and their connection with general technical and special disciplines at multilevel education]. *Novye obrazovatel'nye sistemy i tekhnologii obucheniya v vuze* [New educational systems and training technologies Institutions of Higher Education]. Volgograd, 1998. Iss. 4. Part 2. Pp. 117—121.

8. Kharitonova L. P. [To the issue of research of new educational technologies for studying of higher mathematics course and other sciences in Institutions of Higher Education]. *Nauka i obrazovanie v XXI veke: sb. nauch. trudov po mater. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Ch. VII* [Science and education in XXI century. Proc. of Int. Sci.-Pract. Conf. Part VII]. Moscow, AR-Konsalt Publ., 2014. Pp. 83—85.

9. Abdykarimova A. Zh., Seitova S. M. [Effectiveness of organization of individual works in course of mathematic analysis with usage of neurolinguistical programming]. *Put' nauki. Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal* [The Way of Science. International scientific journal], 2015, № 1(11).

10. Varenina L. P. [Intensive course and technology of neuro-linguistic programming in teaching foreign languages in non-language Institutions of Higher Education]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gumanitarnogo universiteta im. M. A. Sholokhova. Pedagogika i psikhologiya* [News of Moscow State Humanities University named after M. A. Sholokhov. Pedagogics and psychology], 2012, no. 3, pp. 35—38.

11. Nagornov Yu. S., Nagornova A. Yu., Pogrebnyaya O. S., Prilepskih O. S., Korneeva S. A., Kiryukhina D. V. [Use of neuro-linguistic programming in teaching the special course "Principals of nanotechnologies"]. *Pedagogicheskie nauki* [Pedagogical sciences], 2013, no. 3. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=8829>.

12. Tropkina Yu. V. *Innovatsionnyi opyt obucheniya pis'mennoi rechi v professional'noi podgotovke i perepodgotovke slushatelei voenno-morskikh vuzov* [Innovative experience of teaching written language in professional training and retraining of students of Naval Academies. Diss. Cand. Pedagog. Sci.]. Saint Petersburg, 2014. 212 p.

13. Haritonova L. P. [To a question about the mathematical simulation of heat-mass transfer in the devices, including with the impact leakage of the jets]. *Fundamental science and technology — promising developments IV*, vol. 2. USA, North Charleston, 2014. Pp. 176—180.

14. Haritonova L. P. On the problems of the solution of number of problems with a study of the processes of heat-mass transfer, including in the devices with the impact leakage of jets, with the use of freely extended software with the open initial code, in particular OPENFOAM. *Материалы Международной науч.-практич. конф. «21 век: фундаментальная наука и технологии VII» (21 century: fundamental science and technology VII)*. Vol. 2. North Charleston. USA. 2015. Pp. 127—130.

15. Kharitonova L. P. [Mathematical modeling of heat and mass transfer processes in devices with impact leakage of stream systems and a number of problem-solving methods with the use of FLUENT package and freely distributed software with an open source code (including OPEN FOAM)]. *International Scientific and Practical Conference "WORLD SCIENCE" (Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Modern Scientific Achievements and Their Practical Application (October 20—21, 2015, Dubai, UAE)"*, 2015, no. 3(3), vol. 1. November. Pp. 54—56.

16. Rudenok I. P., Kharitonova L. P., Rybakova O. V., Vishnyakova E. G. *Izbrannye glavy vysshei matematiki. Elementy diskretnoi matematiki i sluchainykh funktsii: uchebnoe posobie* [Selected chapters of higher mathematics. Elements of discrete mathematics and stochastic functions. Textbook]. Volgograd, VSUACE Publ., 2004. 107 p.

17. Bolotina N. N., Kharitonova L. P., Rudenok I. P. *Vysshaya matematika: ucheb.-prakt. posobie* [Higher mathematics. Textbook]. Volgograd, VSUACE Publ., 2012. 318 p.

18. Kireeva A. I., Rudenok I. P., Kharitonova L. P. *Izbrannye razdely vysshei matematiki: kratkii teoreticheskii kurs dlya podgotovki k federal'nomu Internet-ekzamenuv sfere professional'nogo obrazovaniya po distsipline «Matematika»: v 2 ch. Ch. 1* [Selected chapters of higher mathematics: short theoretical course for revising for federal Internet examinations in the sphere of prof. education in "Mathematics" discipline. In 2 parts. Part 1]. Volgograd, VSUACE Publ., 2014. 199 p.

19. Dilts Robert. *Modelirovanie s pomoshch'yu NLP* [Modeling with the help of neuro-linguistic programming]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2000. 288 p.

*For citation:*

Kharitonova L. P., Burlachenko O. V. [Problems and some methods of increasing the efficiency of modeling using NLP in higher mathematics, including the solution of ecological tasks]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2016, iss. 43(62), pp. 270—280.

*About authors:*

**Kharitonova Larisa Petrovna** — Candidate of Engineering Science, Docent, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [haritonova410@yandex.ru](mailto:haritonova410@yandex.ru)

**Burlachenko Oleg Vasil'evich** — Doctor of Engineering Science, Professor, Vice-Rector for Studies and Educational Work, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, [oburlachenko@yandex.ru](mailto:oburlachenko@yandex.ru)