Министерство образования и науки Российской Федерации

# ВЕСТНИК

# ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

# Серия: Строительство и архитектура

Выпуск 36(55)

Научно-теоретический и производственно-практический журнал

2014

Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroiteľnogo universiteta Seriya: Stroiteľstvo 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

### Содержание

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

<b>Асланов Л.</b> Математическое моделирование оценки свойств неоднородных волновых процессов, влияющих на морские сооружения	6
<b>Бережная Е. В., Стебловский И. А.</b> Об одной возможности формирования геометрии балки в	
условиях многовариантности загружений	10
<b>Богомолов А. Н., Подлинев М. О., Павлов Д. В., Богомолов С. А.</b> Условия устойчивости горизонтальной выработки, устраиваемой в связном грунте вблизи активной зоны ленточного фунда-	
мента	15
<b>Богомолов А. Н., Ушаков А. Н., Богомолова О. А.</b> О формуле для тангенциального нормального	
напряжения в точках границы бесконечной односвязной области	24
Ушаков А. Н. О регулярности отображающей функции, используемой для анализа напряженного	
состояния вокруг внутренней границы односвязной бесконечной области	30
Скибин Г. М., Дыба В. П., Кидакоев А. М. Экспериментальная оценка теоретического реше-	
ния смешанной задачи о напряженно-деформированном состоянии основания ленточных	
фундаментов	37
СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ	
<b>Ганицев М. П., Рахимов А. И., Акчурин Т. К.</b> Разработка составов и технологий эффективных	
строительных композиций на основе гидроксилсодержащих сополимеров с полиизоцианатом	45
<b>Гончарова М. А., Корвяков Ф. Н.</b> Выявление механизма участия конвертерных шлаков в структу-	
рообразовании эффективных строительных композитов	54
<b>Ерофеев В. Т., Фомичев В. Т., Хуторской С. В.</b> Исследование влияния электромагнитной акти-	50
вации воды затворения на свойства композитов на основе извести	59

<b>Поганина В. И., Пышкина И. С.</b> Влияние режима синтеза наполнителя на структуру и свойства известковых сухих строительных смесей <b>Пичугин А. П., Хританков В. Ф., Белан И. В., Акчурин Т. К.</b> Разработка составов сухих строительных смесей с повышенными эксплуатационными характеристиками	64 68
СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Бандурин Н. Г., Калашников С. Ю., Михальчук А. В. Исследование НДС сжато-изогнутого стержня на основе решения дифференциального уравнения четвертого порядка Бандурин Н. Г., Калашников С. Ю. Численный метод 9-го порядка точности для решения одномерных существенно нелинейных дифференциальных уравнений Беликов Г. И. Основы теории упругих сетчатых пластинок с конечной сдвиговой жесткостью Богданов В. И. Синтез механизмов для устройств с остовом регулируемой конструкции Игнатьев А. В., Онищенко Е. В. Расчет нерастяжимой преднапряженной контргрузом нити по методу конечных элементов в форме классического смешанного метода Старов А. В. Динамика пластических оболочек с учетом упрочнения и чувствительности к скорости деформирования Старов А. В. Пластическое деформирование круглых пластинок с защемлением края при ло-кальном нагружении жестким штампом Старов А. В. Область применимости теории больших прогибов идеально пластических круглых пластинок и пологих оболочек вращения Старов А. В. Пластическое деформирование круглых пластинок с шарнирным опиранием края при локальном нагружении жестким штампом Шкода Г. Г. Стадии напряженного состояния сталефибробетона при растяжении	78 86 91 100 104 112 119 126 133 141
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ	
<b>Любченко А. С.</b> Совершенствование системы содержания автомобильных дорог России с учетом опыта Германии <b>Серова Е. Ю., Сапожкова Н. В., Мельников В. В.</b> Анализ формирования пассажиропотоков на улично-дорожной сети Волгограда <b>Серова Е. Ю., Сапожкова Н. В., Мельников В. В.</b> Проблемы организации движения и обеспечения экологической безопасности городского пассажирского транспорта в Волгограде <b>Сидоренко В. Ф., Сапожкова Н. В.</b> Организация дорожного движения для людей с ограниченными возможностями по зрению <b>Скоробогатиченко Д. А., Ерохин А. В.</b> Нечеткая нейросетевая модель для прогнозирования числа ДТП региона в условиях ограниченной информации	149 157 163 168 174
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ	
Колодяжный С. А., Кавыгин А. А. Расчет современных пластинчатых рекуператоров с использованием функции коэффициента полезного действия Фокин В. М., Ковылин А. В., Полова А. В. Экспериментальное исследование энергоэффективности стеклопакета для ограждения зданий Фокин В. М., Полова А. В., Ковылин А. В. Экспериментальное исследование энергоэффективности стеклопакета с теплозащитными пленками Фокин В. М., Усадский Д. Г., Иванищева Н. В. Концепция повышения эффективности теплонаносных установок	182 189 196 201
ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ	
Москвичева Е. В., Доскина Э. П., Москвичева А. В., Кузьмина Т. А., Самойленко М. А. Исследование факторов, снижающих эффективность очистки сточных вод на машиностроительных предприятиях Шубин М. А. Анализ и оценка влияния пруда-накопителя ОАО «Химпром» на качество подземных вод, используемых для водоснабжения населения	20 <i>6</i> 211
ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ	
<b>Фоменко Н. А., Богданов В. И., Сапожкова Н. В.</b> Пути совершенствования гидропривода тяговотранспортных средств	218
БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ И ОХРАНА ТРУДА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ	
<b>Габибов Ф. Г., Багиров К. А.</b> Исследование проблем анализа риска возникновения чрезвычайных ситуаций на химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятиях	223

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА	
<b>Абрамян С. Г., Ахмедов А. М., Халилов В. С., Уманцев Д. А.</b> Развитие монолитного строительства и современные опалубочные системы	231
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА	
<b>Абрамян С. Г., Атопов В. И., Ахмедов А. М., Беспалая Е. Н.</b> Экологическое состояние Волгограда: проблемы, скрытые источники загрязнения	240
<b>Матовников С. А., Анопин В. Н., Матовникова Н. Г.</b> Ландшафтно-архитектурные методы в зеленом строительстве Волгоградской агломерации <b>Коростелева Н. В.</b> К вопросу обеспечения экологической безопасности на территории Волго-	248
града <b>Соколов И. И., Муслимова Д. Р., Соколов А. И., Горюнова Е. И., Мельникова Е. И.</b> Возможности	258
рекреационной деятельности на территории Волгоградской области	264
ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. ТЕОРИЯ РАЗВИТИЯ ГОРОДА	
<b>Атопов В. И.</b> Большой Волгоград — новый стратегический выбор в исторической миссии Сталинграда	268
<b>Красильникова Э. Э., Русанов В. А., Кузина Л. А.</b> Современные тенденции формирования гибких и устойчивых жилых образований	275
<b>Финка М., Красильникова Э. Э.</b> Градостроительная регенерация: от планирования до управления	284
АРХИТЕКТУРА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ	
<b>Шевченко Л. П., Мельникова О. И.</b> Современные тенденции функциональной организации зарубежных языковых школ	291
НАШИ АВТОРЫ	295

### Content

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS. BASEMENTS, FOUNDATIONS,

UNDERGROUND STRUCTURES	
Aslanov L. Mathematical modeling of assessment of properties of heterogeneous wave processes influencing marine constructions  Berezhnaya E. V., Steblovskiy I. A. Concerning one possibility of formation of beam geometry under	6
multiple loading	10
Bogomolov A. N., Podlinev M. O., Pavlov D. V., Bogomolov S. A. Conditions of stability of horizontal	
working in cohesive soil close to the zone of strip foundation	15
<b>Bogomolov A. N., Ushakov A. N., Bogomolova O. A.</b> About the formula for tangential normal tension in points of border of the infinite one-coherent area	24
<b>Ushakov A. N.</b> About the regularity of the displaying function used for the analysis of the stress state round internal border of simply connected infinite region	30
<b>Skibin G. M., Dyba V. P., Kidakoev A. M.</b> Experimental estimation of theoretical solutions of the mixed problem of stress-strain state of strip foundations	37
BUILDING MATERIALS AND ARTICLES	
<b>Ganitsev M. P., Rakhimov A. I., Akchurin T. K.</b> Development of structures and technologies of effectiveness of construction compositions based on hydrous copolymers with the polyisocyanate	45
<b>Goncharova M. A., Korvyakov F. N.</b> Reveal of the process of participation of converter slag in structur-	15
ing of effective construction composites	54
Erofeev V. T., Fomichev V. T., Khutorskoy S. V. Investigation of the influence of electromagnetical mixing water activation on properties of lime-based composites  Loganina V. I., Pyshkina I. S. Effect of synthesized fillers on the structure and properties of dry lime	59
construction mixes	64
<b>Pichugin A. P., Khritankov V. F., Belan I. V., Akchurin T. K.</b> The development of compositions of dry construction mixes with advanced performance characteristics	68
STRUCTURAL MECHANICS	
<b>Bandurin N. G., Kalashnikov S. Yu., Mikhal'chuk A. V.</b> Research of VAT of compressed-bent rod based on the solution of differential equation of the 4 <sup>th</sup> order	78
<b>Bandurin N. G., Kalashnikov S. Yu.</b> Numerical method of 9 <sup>th</sup> order of accuracy for the solution of one-	78
dimensional highly nonlinear differential equations	86
<b>Belikov G. I.</b> Foundations of the theory of elastic mesh plates with finite shear rigidity	91
<b>Bogdanov V. I.</b> Synthesis of mechanisms for devices with the frame of regulative construction	100
<i>Ignat'ev A. V., Onishchenko E. V.</i> Calculation of inextensible thread prestrained by counterweight by the finite element method in the form of classical mixed method	104
<b>Starov A. V.</b> Dynamics of plastic shells taking into account hardening and sensitivity to the speed of	104
deformation	112
<b>Starov A.</b> V. Plastic deformation of circular plates with the rigid fixing of the edge under local loading	
by a rigid press tool	119
<b>Starov A. V.</b> The area of applicability of the theory of great slags of ideally plastic circular plates and shallow roller shells	126
<b>Starov A. V.</b> Plastic deformation of circular plates with hinged edge under local loading by a rigid press	120

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

Shkoda G. G. Stages of the stress state of steel fiber concrete under tension

*Lyubchenko A. S.* Improving the system of maintenance of highways in Russia based on the basis of German experience

 $\textbf{Serova E. Yu., Sapozhkova N. V., Mel'nikov V. V.} \ \, \text{Analysis of formation of passenger traffic on the road network in the city Volgograd}$ 

**Serova E. Yu., Sapozhkova N. V., Mel'nikov V. V.** Problems of traffic organization and ensurance of environmental safety in urban passenger transport in Volgograd

**Sidorenko V. F., Sapozhkova N. V.** Management of traffic for disabled people with poor eyesight **Skorobogatchenko D. A., Erokhin A. V.** Fuzzy connectionist model to forecast the number of accidents in the region taking into account limited infirmation

133

141

149

157

163

168

174

HEAT SUPPLY, VENTILATION, AIR CONDITIONING, GAS SUPPLY AND ILLUMINATION	
Kolodyazhny S. A., Kavygin A. A. Design of modern plate recuperators with the use of function of efficiency coefficient Fokin V. M., Kovylin A. V., Popova A. V. Experimental study of the energy efficiency of a glass unit for	182
enclosures of buildings  Fokin V. M., Popova A. V., Kovylin A. V. Experimental study of the energy efficiency of a glass unit	189
with heat-shielding film Fokin V. M., Usadskiy D. G., Ivanishcheva N. V. Concept of increase of efficiency of heat pump systems	196 201
WATER SUPPLY, SEWERAGE, CONSTRUCTIONS FOR WATER RESOURCES PROTECTION	
Moskvicheva E. V., Doskina E. P., Moskvicheva A. V., Kuz'mina T. A., Samoylenko M. A. Research of the factors reducing the efficiency of waste water treatment at machine-building enterprises Shubin M. A. Analysis and assessment of the impact of pond «Khimprom» on groundwater quality, used for water supply	206 211
HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY	
Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Sapozhkova N. V. Ways of improvement of a hydraulic actuator of traction vehicles	218
LIFE SAFETY AND LABOR SAFETY IN CONSTRUCTION	
<b>Gabibov F. G., Bagirov K. A.</b> Studying of problems of the analysis of risks of emergency at chemical, oil and chemical and oil-refining enterprises	223
TECHNOLOGY AND CONTROL IN CONSTRUCTION	
Abramyan S. G., Akhmedov A. M., Khalilov V. S., Umantsev D. A. The development of monolithic construction and modern formwork systems	231
ENVIRONMENTAL ISSUES IN URBAN PLANNING	
Abramyan S. G., Atopov V. I., Akhmedov A. M., Bespalaya E. N. The ecological state of Volgograd: problems, hidden sources of pollution	240
<b>Matovnikov S. A., Anopin V. N., Matovnikova N. G.</b> Landscape and architectural methods in green construction in Volgograd agglomeration <b>Korosteleva N. V.</b> To the issue of provision of ecological safety on the territory of Volgograd	248 258
Sokolov I. I., Muslimova D. R., Sokolov A. I., Goryunova E. I., Mel'nikova E. I. Resources of recreational activity on the territory of Volgograd oblast	264
URBAN PLANNING. THEORY OF URBAN DEVELOPMENT	
Atopov V. I. Big Volgograd — new strategic choice in the historical mission of Stalingrad Krasil'nikova E. E., Rusanov V. A., Kuzina L. A. Modern tendencies in formation of flexible and sustainable residential structures	268 275
Finka M., Krasilnikova E. E. Urban regeneration: from planning to management	284
GENERAL ARCHITECTURE.	
<b>Shevchenko L. P., Mel'nikova O. I.</b> Modern trends in the functional organization of foreign language schools	291
OUR AUTHORS	295

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ, ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.501

#### Л. Асланов

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ НЕОДНОРОДНЫХ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА МОРСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

Рассмотрены проблемы математического моделирования оценки свойств однородных волновых процессов, влияющих на морские сооружения. Составлены и решены неоднородные волновые уравнения, удовлетворяющие нулевым начальным условиям при моменте времени t, который имеет какой-то параметр времени  $\tau$ ,  $\tau$ . е.  $t=\tau$ . Определены функции изменения неоднородных волновых процессов во времени v(x,y,z,t) на выделенной площади S для строительства морских сооружений, а также функции u(x,y,z,t) во времени  $t=\tau$ , с использованием формулы Пуассона с начальным условием  $t=\tau$ .

К л ю ч е в ы е с л о в а: неоднородные волновые процессы, нулевые начальные условия, прямоугольные координаты, функции изменения координат во времени.

The problems of mathematical modeling of assessment of properties of homogeneous wave processes influencing marine structures are discussed. The authors formulate and solve the heterogeneous wave equation, satisfying the zero initial conditions at the moment of time t, which has a time parameter  $\tau$ , i.e.  $t = \tau$ . Changes in the functions of the heterogeneous wave processes in time v(x, y, z, t) on a selected area of S, for the construction of marine structures and the functions u(x, y, z, t) in time  $t = \tau$ , using the Poisson formula with initial conditions  $t = \tau$ .

 $K\ e\ y\ w\ o\ r\ d\ s:$  heterogeneous wave processes, zero initial conditions, rectangular coordinates, functions of the coordinate changes in time.

**Анализ состояния проблемы.** В настоящее время в Каспийском море строятся морские сооружения на свайных фундаментах. На эти сооружения ударными силами воздействуют неоднородные морские волны. Поэтому необходимо математически смоделировать процесс возникновения неоднородных волновых явлений для оценки свойств, влияющих на конструкцию морских сооружений.

**Результаты исследований.** В некоторых источниках [1—5] предложено определение смещения сооружений от волновых воздействий, однако не указано смещение свайных фундаментов под морским сооружением от волновых воздействий. Для оценки свойства неоднородных волновых процессов рассмотрим решение неоднородного волнового уравнения. Предлагаем составить уравнение неоднородных волновых процессов в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + g(x, y, z, t), \tag{1}$$

и будем искать его решение, удовлетворяющее нулевым начальным условиям

$$u_{|t=0} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t_{|t=0}} = 0. \tag{2}$$

Для решения этой задачи рассмотрим решение однородного уравнения следующего вида:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial t^2} = a^2 \left( \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial z^2} \right),\tag{3}$$

удовлетворяющее начальным условиям

$$u_{|t=\tau} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t_{t=\tau}} = g(x, y, z, \tau), \tag{4}$$

причем за начальный момент взято не t = 0, а  $t = \tau$ , где  $\tau$  — некоторый параметр времени. Решение формулы (3) с начальными условиями (4) будем выражать формулой Пуассона, но только в этой формуле нужно заменить t на t- $\tau$ . Тогда будем иметь:

$$\upsilon(x, y, z, \tau) = \frac{t - \tau}{4\pi} \iint_{S_1} g\left[x + \alpha a(t - \tau), y + \beta a(t - \tau), z + \gamma a(t - \tau)\tau\right] d\sigma_1, \quad (4')$$

где  $S_1$  — площадь поверхности жидкости при неоднородном волновом процессе.

Отметим, что функция u(x, y, z, t), определенная формулой

$$u(x, y, z, t) = \int_{0}^{t} \upsilon(x, y, z, \tau) d\tau,$$
 (5)

является решением неоднородного волнового уравнения следующего вида, как в плоскости

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \tag{6}$$

при нулевых начальных условиях (2). Действительно, из формулы (5) находим:

$$\Delta u = \int_0^t \Delta v(x, y, z, \tau) d\tau. \tag{7}$$

Дифференцируя выражение (5) по t, получим:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \int_0^t \frac{\partial v(x, y, z, \tau)}{\partial t} d\tau + v(x, y, z, \tau)_{|\tau=t}.$$
 (8)

Если  $\beta a(t-\tau)$ , z=0, то изменение во времени получит вид (8).

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \int_0^t \frac{\partial^2 v(x, y, z, \tau)}{\partial t^2} d\tau + g(x, y, z, t). \tag{9}$$

Из формул (7), (9) и уравнения (3) легко увидеть, что функция u(x, y, z, t) удовлетворяет неоднородному уравнению (1). Начальные условия (2) также выполнены, что следует из формул (5) и (8).

Подставив в формулу (5) вместо функции  $\upsilon(x, y, z, \tau)$  ее выражение (4'), получим:

$$u(x, y, z, \tau) = \frac{1}{4\pi} \int_{0}^{t} (-\tau) \left\{ \iint_{S_1} g\left[x + \alpha a(t - \tau), y + \beta a(t - \tau), z + \gamma a(t - \tau)\tau\right] d\sigma_1 \right\} d\tau.$$

Введем вместо  $\tau$  новую переменную интегрирования  $r = (t - \tau)$ . Тогда будем иметь:

$$u(x, y, z, \tau) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{\alpha e} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \left( x + \alpha r, y + \beta r, z + \gamma r, t - \frac{r}{a} \right) r^2 \sin \theta_1 d\theta_1 d\theta_2 dr.$$

Введя вместо сферических прямоугольные координаты

$$\xi = x + \alpha r$$
,  $\eta = y + \beta r$ ,  $\Omega = z + \gamma r$ 

и учитывая, что  $\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 1$ , получим:

$$r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\Omega)^2}$$

и выражение для u(x, y, z, t) окончательно запишется в виде:

$$u(x, y, z, t) = \frac{1}{4\pi^2} \iiint_{D_{at}} \frac{g\left(\xi, \eta, \Omega, t - \frac{r}{a}\right)}{r} d\xi d\eta d\Omega, \tag{10}$$

где  $D_{at}$  — шар радиуса  $\alpha t$  с центром в точке (x, y, z).

Выражение (10) можно называть запаздывающим потенциалом, так как при выполнении интегрирования функция g берется не в рассматриваемый момент времени t, а в момент времени  $t-\frac{r}{a}$ , предшествующий t на промежуток времени, который требуется, чтобы процесс, распространяющийся со скоростью a, прошел путь от точки ( $\xi$ ,  $\eta$ ,  $\Omega$ ) до точки (x, y, z).

Также можно получить решение неоднородного уравнения

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g(x, y, t) \tag{11}$$

с нулевыми начальными условиями

$$u_{|t=0} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t_{|t=0}} = 0. \tag{12}$$

Это решение получается в виде

$$u(x, y, t) = \frac{1}{2\pi a} \int_0^t \left[ \iint_{\rho \le a(t-\tau)} \frac{g(\xi, \eta, \Omega) d\xi d\eta}{\sqrt{a^2 (t-\tau)^2 - \rho^2}} \right] d\tau, \tag{13}$$

где  $\rho^2 = (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2$ .

В случае уравнения

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + g(x, t) \tag{14}$$

решение, удовлетворяющее нулевым начальным условиям, будет следующим:

$$u(x,t) = \frac{1}{2a} \int_0^t \left[ \int_{x-a(t-\tau)}^{x+a(t-\tau)} g(\xi,\tau) d\xi \right] d\tau.$$
 (15)

Таким образом, можно решить неоднородные уравнения, которые характеризуют неоднородные волновые процессы, сильно влияющие на колебания морских сооружений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Левитан Б. М.* Разложения по собственным функциям дифференциальных уравнений второго порядка. М.: Гостехиздат, 1950. 140 с.
- 2. Асланов Л. Ф. Комбинирон реологическим модел за описане на линейно еластично напрегнато състояние на шельфа : Сб. с доклади П. Шеста межнародна научна конференция «Архитектура, строительство съвременност», 30 май 1 юни 2013 г. Варна, Болгария. С. 159—167.
- 3. Асланов Л. Ф. Расчет понтона и всплытия опорного блока при различных глубинах моря для освоения нефтегазовых месторождений // Сб. докладов Международной научнопрактической конференции «Строительство и ремонт скважин 2014». Геленджик, Краснодарский край. Краснодар, 2010. С. 67—72.
- 4. *Асланов Л. Ф.* Кольцевые волны и влияние их поверхности на свайные фундаменты во время эксплуатации морских сооружений // ВНИИОЭНГ. 2014. № 3. С. 32—34.
- 5. *Асланов Л.* Ф. Процесс возникновения двумерных волн и их влияние на свайные фундаменты при строительстве морских сооружений // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2013. № 72. С. 163—167.
- 1. *Levitan B. M.* Razlozheniya po sobstvennym funktsiyam differentsial'nykh uravneniy vtorogo poryadka. M.: Gostekhizdat, 1950. 140 s.
- 2. Aslanov L. F. Kombiniron reologicheskim model za opisane na lineyno elastichno napregnato s"stoyanie na shel'fa : Sb. s dokladi II. Shesta mezhnarodna nauchna konferentsiya «Arkhitektura, stroitel'stvo s"vremennost», 30 may 1 yuni 2013g. Varna, Bolgariya. S. 159—167.
- 3. *Aslanov L. F.* Raschet pontona i vsplytiya opornogo bloka pri razlichnykh glubinakh morya dlya osvoeniya neftegazovykh mestorozhdeniy // Sb. dokladov Mezhdunarodnoy nauchnoprakticheskoy konferentsii «Stroitel'stvo i remont skvazhin 2014». Gelendzhik, Krasnodarskiy kray. Krasnodar, 2010. S. 67—72.
- 4. *Aslanov L. F.* Kol'tsevye volny i vliyanie ikh poverkhnosti na svaynye fundamenty vo vremya ekspluatatsii morskikh sooruzheniy // VNIIOENG. 2014. № 3. S. 32—34.
- 5. *Aslanov L. F.* Protsess vozniknoveniya dvumernykh voln i ikh vliyanie na svaynye fundamenty pri stroitel'stve morskikh sooruzheniy // Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2013. № 72. S. 163—167.

© Асланов Л., 2014

Поступила в редакцию в январе 2014 г.

#### Ссылка для цитирования:

Асланов Л. Математическое моделирование оценки свойств неоднородных волновых процессов, влияющих на морские сооружения // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 6—9.

УДК 624.04

#### Е. В. Бережная, И. А. Стебловский

# ОБ ОДНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИИ БАЛКИ В УСЛОВИЯХ МНОГОВАРИАНТНОСТИ ЗАГРУЖЕНИЙ

Рассмотрена многокритериальная задача по определению длины консольного участка балки. В результате определено положение опоры, минимальным образом отличающееся от результатов решения всех локальных задач оптимизации, соответствующих различным загружениям.

Ключевые слова: многокритериальность, плотность потенциальной энергии деформации, рационализация, длина консольного участка.

The article considers the multiple problem of determination of the length of console area of a beam. As a result, the position of the support beam, which has the minimum difference with the results of all solutions to local problems of optimization corresponding to different loadings. has been determined.

 $K\,e\,y\,$  words: multiple variants, density of potential energy deformation, rationalization, length of console area.

Особенностью, которая присуща любому практическому проектированию, является, без сомнений, многокритериальность. Она зачастую сводит к нулю эффект искомого оптимального решения, которое соответствует какому-либо одному критерию. А если посмотреть с другой стороны, лишь в ограниченном количестве ситуаций возможно введение в задачу только одного критерия. Постулируемая концепция, которая базируется на регулировании плотности потенциальной энергии деформаций, существенно расширяет возможности построения рациональных решений, но при этом очень зависит от конкретного загружения конструкции. Таким образом, поиск рациональных решений в условиях многообразия критериев необходим, однако сопряжен с большими вычислительными трудностями. В связи с этим предлагается алгоритм приближенного решения этой задачи [1—3].

Суть данного метода заключается в следующем. Сначала решаются последовательно все частные задачи оптимизации или регулирования. То есть при одних и тех же записанных ограничениях разыскивается экстремум каждого в отдельности сформулированного критерия. При этом для экстремального значения рассматриваемого критерия определяются соответствующие величины остальных. При рассмотрении критерия как координаты (в нашем случает координаты двумерного пространства) появляется возможность построения некой области О, в пределах и на границе которой удовлетворены все ограничения задач. Данная область имеет характерные точки, в которых соответствующий критерий принимает экстремальное значение.

Опираясь на данный подход, мы отдельно посчитали задачи для каждого случая загружения и определили минимальную энергию деформации и соответствующее ей значение длины консоли.

Рассматриваемая конструкция имеет защемление с одной стороны и шарнирно-подвижную опору с другой и загружена двумя нагрузками (временная и постоянная). Задача один раз статически неопределима по методу сил (рис. 1).

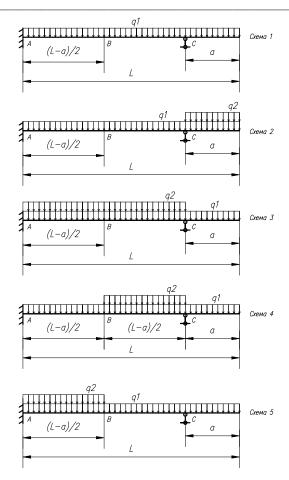


Рис. 1. Схемы загружения конструкции

В связи с этим сперва раскрывалась статическая неопределимость для каждой схемы. Для упрощения расчетов все, кроме первой, схемы рассчитывались только на временную нагрузку, а затем по принципу независимости действия сил складывались значения моментов и опорных реакций в характерных точках. Затем записывались уравнения моментов по характерным участкам. Для упрощения вида выражений был введен коэффициент k, при помощи которого выражается временная нагрузка  $q_2$  через постоянную  $q_1$ . Для того чтобы по максимуму отобразить решение, коэффициент k принимался равным 0; 0,5 и 1. Однако при коэффициенте k=0 задача приобретает вид, моделирующий нагрузку только от собственного веса.

По формуле (1) определялась потенциальная энергия деформации:

$$U = \frac{1}{2EJ} \int_{0}^{L} M^{2}(x) dx.$$
 (1)

Затем, дифференцируя потенциальную энергию деформации по a и приравняв ее к 0, получим уравнение относительно длины консоли. Решив его, получим то значение консоли, при котором потенциальная энергия деформации минимальна:

$$\frac{dU}{da} = 0 \to a. \tag{2}$$

Подставив найденное значение a в (1), получим минимальное значение  $U_{\min}$ . Значение длины консоли и потенциальной энергии деформации i-й точки при k=1,0 приведены в табл.

Значения длины консоли и по- $N_{\underline{0}}$ тенциальной энергии деформа-Эпюра моментов cxeции при k = 1,0МЫ Значение а 3начение U0.042qL<sup>2</sup>  $\frac{1,77\cdot 10^{-4}L^5q^2}{EJ}$ 1 0.29L0.021al 0.050qL<sup>2</sup> 0.050qL<sup>2</sup>  $\frac{2,52 \cdot 10^{-4} L^5 q^2}{EJ}$ 2 0,224L0.067qL<sup>2</sup> 0.067qL<sup>2</sup>  $\frac{4,49\cdot 10^{-4} L^5 q^2}{EJ}$ 3 0,366L0.0335qL 0.058qL<sup>2</sup> 0.049qL<sup>2</sup>  $\frac{3,13\cdot 10^{-4} L^5 q^2}{EJ}$ 4 0,342L0.028aL  $0.053qL^{2}$ 0.063qL2  $\frac{3,14\cdot 10^{-4} L^5 q^2}{EJ}$ 5 0,325L0.028qL

Значения длины консоли и потенциальной энергии деформации при k=1,0

Если следовать данному подходу, то в качестве решения для случая равнозначных критериев принимается точка на поверхности O, равноотстоящая от характерных точек (в нашем случае их 5). В общем случае точка или вектор разыскивается с учетом «весовых» коэффициентов. Под равноотстоящей понимается точка, сумма расстояний от которой до всех характерных точек имеет наименьшее значение.

Из вышесказанного следует, что разница между значениями энергии деформации и длиной консоли для различных видов загружения должна быть минимальной (3):

$$\Delta = \sum_{i=1}^{5} \gamma_i \sqrt{(a_i - a_x)^2 + (U_i - U_x)^2} \to \inf,$$
 (3)

где  $\gamma_i$  — весовой коэффициент;  $a_i, U_i$  — значение длины консоли и потенциальной энергии деформации i-й точки соответственно;  $a_x, U_x$  — искомые значения длины консоли и потенциальной энергии деформации соответственно.

Для определения искомых значений длины консоли и потенциальной энергии деформации необходимо решить систему, состоящую из 2-х уравнений и 2-х неизвестных:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta}{da_x} = 0, \\ \frac{d\Delta}{dU_x} = 0. \end{cases}$$
 (4)

Данная система была решена с использованием вычислительного комплекса MathCAD:

при 
$$k = 0.5$$
  $a_x = 0.318L$ ,  $U_x = 2.42 \frac{10^{-4} L^5 q^2}{EJ}$ ;

при 
$$k=1,0$$
  $a_{\scriptscriptstyle X}=0,338L$  ,  $U_{\scriptscriptstyle X}=3,13\frac{10^{-4}L^5q^2}{EJ}$  .

По данным табл. построен график (рис. 2) значений потенциальной энергии деформации при k=1,0.

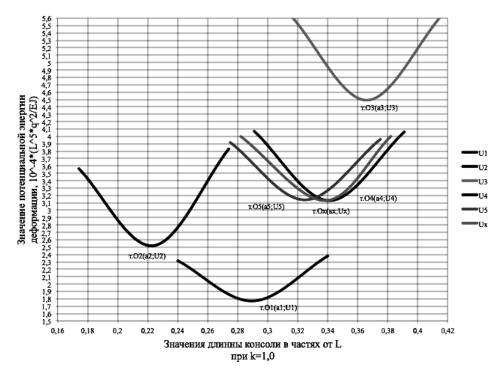


Рис. 2. Диаграмма значений потенциальной энергии деформации при k = 1,0

*Вывод*. В результате решения многокритериальной задачи путем поиска компромисса по методу В. С. Шмуклера было определено положение опоры, минимальным образом отличающееся от результатов решения всех локальных задач оптимизации, соответствующих различным загружениям. Следует

отметить, что предложенный алгоритм решения многокритериальной задачи возможен при различных краевых условиях и видах (характера) загружений, т. е. является универсальным.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Городецкий А. С., Шмуклер В. С., Бондарев А. В. Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций. Харьков: HTУ «ХРИ», 2003. 889 с.
- 2. Шмуклер В. С., Городецкий А. С. Формирование расчетной модели в условиях регулирования напряженно-деформированного состояния конструкции // Науковий вісник будівництва. Вип. 43. Харьков : ХДТУБА, 2007.
- 3. *Шмуклер В. С., Климов Ю. А., Бурак Н. П.* Каркасные системы облегченного типа. Харьков : Золотые страницы, 2008. 336 с.
- 1. Gorodetskiy A. S., Shmukler V. S., Bondarev A. V. Informatsionnye tekhnologii rascheta i proektirovaniya stroitel'nykh konstruktsiy. Khar'kov: NTU «KhRI», 2003. 889 s.
- 2. Shmukler V. S., Gorodetskiy A. S. Formirovanie raschetnoy modeli v usloviyakh regulirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konstruktsii // Naukoviy visnik budivnitstva. Vip. 43. Khar'kov: KhDTUBA, 2007.
- 3. Shmukler V. S., Klimov Yu. A., Burak N. P. Karkasnye sistemy oblegchennogo tipa. Khar'kov: Zolotye stranitsy, 2008. 336 s.

© Бережная Е. В., Стебловский И. А., 2014

Поступила в редакцию в январе 2014 г.

#### Ссылка для цитирования:

*Бережная Е. В., Стебловский И. А.* Об одной возможности формирования геометрии балки в условиях многовариантности загружений // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 10—14.

УДК 624.131

### А. Н. Богомолов, М. О. Подлинев, Д. В. Павлов, С. А. Богомолов

# УСЛОВИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ, УСТРАИВАЕМОЙ В СВЯЗНОМ ГРУНТЕ ВБЛИЗИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЛЕНТОЧНОГО ФУНДАМЕНТА

Приведены результаты отыскания рационального с точки зрения прочности и устойчивости контура подземной выработки на основе использования условия прочности Кулона. Проведены расчеты по отысканию таких сочетаний физико-механических свойств вмещающего массива грунта и глубины заложения выработки, при которых на ее контуре отсутствуют точки, в которых выполняется условие прочности. В работе проведен анализ напряженного состояния вмещающего массива грунта, графики и формулы, позволяющие определить параметры устойчивой выработки и системы «основание заглубленного ленточного фундамента — выработка».

К л ю ч е в ы е с л о в а: подземные сооружения, фундамент, устойчивость, область пластических деформаций, подземная выработка, эллипс, астроида, круг.

This article presents the results of finding the rational, from the standpoint of strength and stability, circuit of underground working, based on the use of Coulomb strength conditions. The estimates are based on the finding of such combinations of physical and mechanical properties of the massif of the ground and the depth of the elaboration, under which there are no point in its circuit, where the condition of strength is met. The authors carried put the analysis of the stress state of a soil massif, the graphs and formulas allowing to define the parameters of sustainable production and the system "base of buried strip foundation — production".

K e y w o r d s: underground structures, foundations, stability, region of plastic deformation, underground working, ellipse, astroid, circle.

Активное строительство подземных сооружений и освоение подземного пространства ставят задачу обеспечения устойчивости подземных выработок с учетом минимизации затрат на поддержание их в работоспособном состоянии в период эксплуатации.

Очевидно, что для выработок, срок эксплуатации которых мал, является нерациональным использование различного рода обделок для их крепления, поскольку это существенно повышает себестоимость строительства.

Устойчивость подземных выработок зависит от формы их поперечного сечения, напряженно-деформированного состояния и физико-механических свойств вмещающего грунтового массива.

Для оценки степени устойчивости подземных выработок, устраиваемых в связных грунтах без крепления, можно использовать критерий длительной устойчивости грунтового сооружения [1; 2] и условие пластичности Кулона, которое может быть записано одним из следующих образов:

$$\sigma_{1} - \sigma_{2} = (\sigma_{1} + \sigma_{2} + 2\sigma_{cB})\sin \varphi,$$

$$(\sigma_{x} - \sigma_{z})^{2} + 4\tau_{xz}^{2} = (\sigma_{x} + \sigma_{z} + 2\sigma_{cB})^{2}\sin^{2}\varphi,$$

$$tg \theta = tg \varphi,$$
(1)

где  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{xz}$  — безразмерные (в долях  $\gamma h$ ) главные нормальные напряжения и компоненты напряжения в рассматриваемой точке;  $\sigma_{\text{св}} = C(\gamma h \text{tg}\phi)^{-1}$  — приведенное давление связности; C,  $\phi$ ,  $\gamma$ ,  $\theta$  и h — соответ-

ственно удельное сцепление, угол внутреннего трения, объемный вес грунта, угол максимального отклонения и определяющий размер рассматриваемого объекта (например, высота откоса, глубина заложения фундамента, глубина заложения выработки, ее размер и т. д.).

Использование критерия [1; 2] и формул (1) позволяет определить некоторые соотношения между величинами из формул (1), обеспечивающие отсутствие на контуре выработки очагов зарождения областей пластических деформаций, что и определяет устойчивость выработки.

Естественно, что по прошествии некоторого времени, возможно, произойдет изменение главного вектора нагрузок в сторону увеличения (что изменит напряженное состояние вмещающего массива) и его физикомеханических свойств в сторону снижения. Тогда контур выработки перестанет быть устойчивым и произойдет его частичное разрушение, которое обычно сводится к тому, что потолочина выработки принимает форму свода естественного равновесия [3]. Но все это произойдет уже после истечения срока эксплуатации выработки.

Рассмотрим подземные выработки, сечения которых изображены на рис. 1.

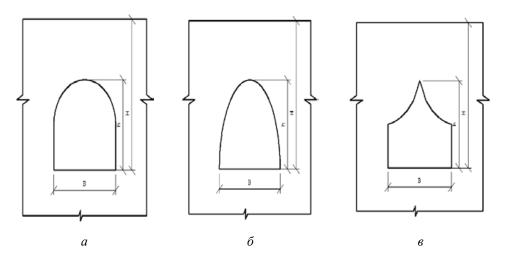


Рис. 1. Формы поперечных сечений подземных выработок: выработка со сводом в виде полукруга (a); полуэллипса ( $\delta$ ); половины астроиды ( $\epsilon$ )

Будем считать, что физико-механические свойства вмещающего массива грунта характеризуются следующими значениями: объемный вес  $\gamma = 2$  т/м³; угол внутреннего трения  $\phi \in [5...45^\circ]$ , а величина приведенного давления связности  $\sigma_{cb} \in [0,03...11,92]$  при условии, что глубина заложения выработки принимает поочередно три значения H = 6.0; 10.0; 16.0 м. Высота и ширина выработки равны соответственно 4 м и 2 м. Необходимо определить такие сочетания физико-механических свойств вмещающего массива грунта и глубины заложения выработки, при которых на ее контуре отсутствуют точки, в которых выполняются условия (1).

Все расчеты, в том числе по определению напряжений, выполнены при помощи компьютерной программы [4], разработанной в ВолгГАСУ.

На рис. 2 в качестве примера приведены изолинии безразмерных (в долях  $\gamma H$ ) напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{xz}$  в окрестностях выработки при условии, что  $H=10~\mathrm{M}$ .

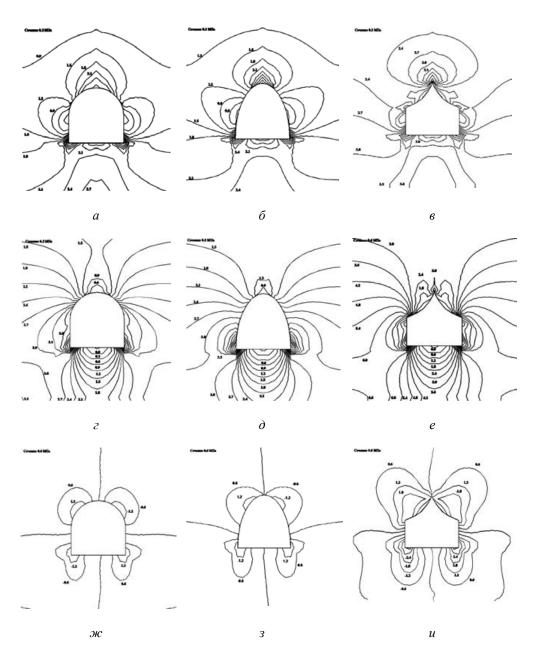
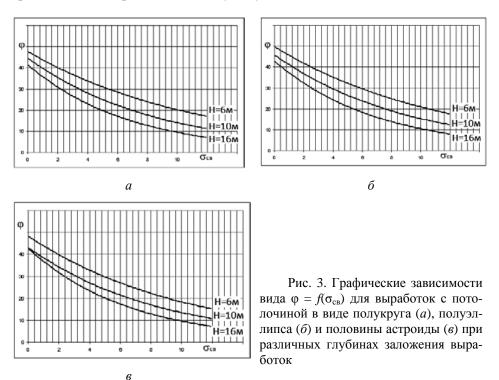


Рис. 2. Изолинии безразмерных (в долях  $\gamma H$ ) горизонтальных нормальных  $\sigma_x$  (a—e); вертикальных нормальных  $\sigma_z$  (z—e) и касательных  $\tau_{xz}$  (x—u) напряжений в окрестностях выработок при условии, что H = 10 м

Расчетами установлено, что с изменением глубины заложения выработки характер изолиний не меняется, а численные значения напряжений увеличиваются пропорционально глубине.

На рис. З приведены графические зависимости вида  $\varphi = f(\sigma_{cg})$  для выработок с потолочиной в виде полукруга, полуэллипса и половины астроиды при различных глубинах заложения выработок. Используя эти зависимости, можно решить две задачи: во-первых, определить, какой должна быть величина давления связности, чтобы на контуре выработки той или иной формы при заданных глубине заложения H и величине угла внутреннего трения  $\varphi$  вмещающего массива грунта отсутствовали точки, «перешедшие» в предельное состояние. Затем, зная, что  $\sigma_{cg} = C(\gamma h t g \phi)^{-1}$ , можно определить минимальное значение удельного сцепления, каким должен обладать массив вмещающего грунта, чтобы устойчивость выработки была обеспечена. Вторая задача является обратной, т. е. по известным физико-механическим свойствам грунта можно определить максимально возможную глубину заложения выработки, на которой последняя будет устойчивой.



Оказалось, что все кривые, приведенные на рис. 3, могут быть с погрешностью, не превышающей 4 %, аппроксимированы зависимостью

$$\varphi = a^{b\sigma_{CB}}, \tag{2}$$

где b — безразмерный коэффициент; a — коэффициент, имеющий размерность [град].

Численные значения коэффициентов a и b могут быть определены по графикам, приведенным на рис. 4.

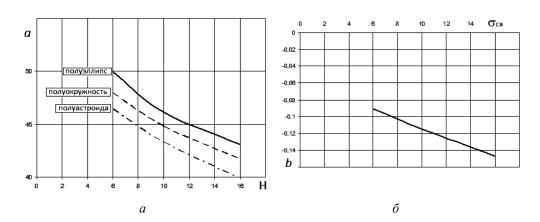


Рис. 4. Графики для определения коэффициентов а и b, входящих в формулу (2)

Рассмотрим теперь систему «основание заглубленного ленточного фундамента — горизонтальная выработка», сечения которой изображены на рис. 5.

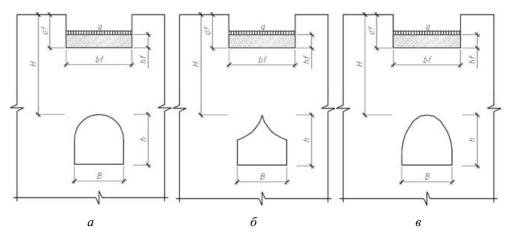


Рис. 5. Формы поперечных сечений подземных выработок: выработка со сводом в виде полукруга (a); половины астроиды ( $\delta$ ); полуэллипса ( $\epsilon$ )

Будем считать, что физико-механические свойства массива грунта в данных условиях будут характеризоваться следующими значениями: объемный вес  $\gamma = 2$  т/м³; угол внутреннего трения, выраженный в радианах,  $\phi \in [0,175...0,524]$ , а величина приведенного давления связности  $\sigma_{cs} \in [10...64]$  при условии, что глубина заложения выработки имеет постоянное значение H = 6 м. Высота и ширина выработки равны B = h = 2 м. Геометрические параметры фундамента мелкого заложения принимают следующие значения: df = 2 м — глубина заложения подошвы фундамента; hf = 0.8 м — высота фундамента; bf = 4 м — ширина фундамента. В качестве материала фундамента принимаем бетон класса В15. Равномерно распределенная нагрузка q выражена в долях  $\gamma h$ .

Надлежит определить такие сочетания физико-механических свойств массива грунта и такое максимальное значение величины равномерно

распределенной нагрузки q, при которых на контуре подземной выработки будут отсутствовать точки, в которых выполняются условия (1). Все расчеты, в том числе по определению напряжений, выполнены при помощи компьютерной программы [4], разработанной в ВолгГАСУ.

На рис. 6 в качестве примера приведены изолинии безразмерных (в долях  $\gamma H$ ) напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{xz}$  в окрестностях выработки при значении q=37,5.

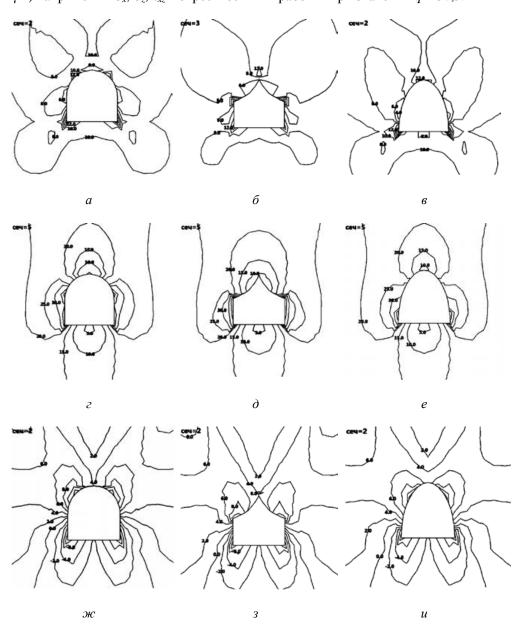
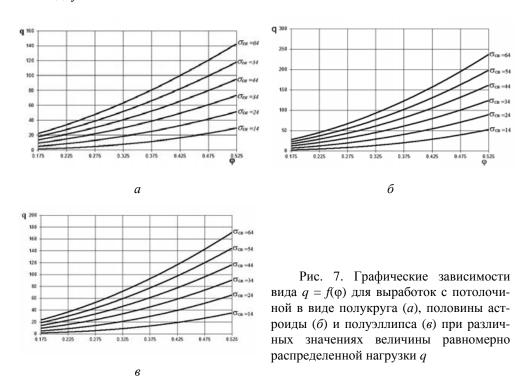


Рис. 6. Изолинии безразмерных (в долях  $\gamma H$ ) горизонтальных нормальных  $\sigma_x$  (a—e); вертикальных нормальных  $\sigma_z$  (z—e) и касательных  $\tau_{xz}$  (x—u) напряжений в окрестностях выработок при значении q=37,5

На рис. 7 представлены графические зависимости вида  $q = f(\phi)$  для выработок с потолочиной в виде полукруга, полуэллипса и половины астроиды при различных значениях величины равномерно распределенной нагрузки, полученные в результате вычислений, аналогичных описанным выше.

Воспользовавшись этими зависимостями, можно решить следующие важные задачи: во-первых, определить, какой может быть максимальная величина равномерно распределенной нагрузки, чтобы на контуре выработки той или иной формы при заданном значении давления связности и величины угла внутреннего трения ф массива грунта отсутствовали точки, «перешедшие» в предельное состояние; во-вторых, зная максимальное значение нагрузки, которая передается на фундамент, и что  $\sigma_{cs} = C(\gamma h t g \phi)^{-1}$ , можно определить минимальное значение удельного сцепления, каким должен обладать массив вмещающего грунта, чтобы устойчивость выработки была обеспечена. Также из полученных графиков видно, что при одинаковых условиях наибольшую нагрузку способен воспринимать контур, который имеет в своей потолочине половину астроиды. Наименьшее восприятие нагрузки соответствует контуру, потолочина которого образована полуокружностью. Вариант подземной выработки, поперечное сечение которой представлено контуром с кровлей в виде полуэллипса, является неким средним вариантом между первыми двумя.



Проанализировав графики, приведенные на рис. 7, можно сделать вывод, что все кривые могут быть с погрешностью, не превышающей 4 %, аппроксимированы зависимостью

$$q = m\varphi^n, \tag{3}$$

где m, n — безразмерные коэффициенты;  $\phi$  — угол внутреннего трения грунта, выраженный в радианах.

Численные значения коэффициентов m и n могут быть определены по графикам, приведенным на рис. 8.

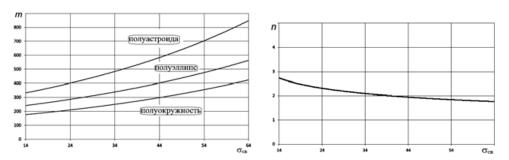


Рис. 8. Графики для определения коэффициентов m и n, входящих в формулу (2)

В результате проведенных расчетов и анализа получена формула и построены графические зависимости, которые позволяют определять:

- 1) численные значения физико-механических свойств вмещающего грунтового массива и глубины заложения выработки, обеспечивающие ее кратковременную устойчивость;
- 2) численные значения физико-механических свойств грунтового массива и максимальную величину равномерно распределенной нагрузки на фундамент, при которых обеспечена кратковременная устойчивость подземных выработок в составе системы «основание заглубленного ленточного фундамента горизонтальная выработка».

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Критерий безопасной эксплуатации и коэффициенты запаса оползнеопасных склонов / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, С. И. Шиян, А. В. Соловьев // Збірник наукових праць. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво. Полтава : [ПолтНТУ], 2010. Вып. 3(28). С. 49—54.
- 2. Новый критерий длительной устойчивости однородных откосов на основе анализа напряженно-деформированного состояния / А. Н. Богомолов, М. Ю. Нестратов, А. В. Соловьев, С. И. Шиян // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2009. № 14. С. 5—12.
- 3. 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). URL: <a href="http://vestnik.vgasu.ru/attachments/BogomolovBogomolovaShubinPavlovPodlinevSolovev-2013">http://vestnik.vgasu.ru/attachments/BogomolovBogomolovaShubinPavlovPodlinevSolovev-2013</a> 2(27) (дата обращения: 01.04.2014).
- 4. Устойчивость (Напряженно-деформированное состояние): свид. о гос. рег. программ для ЭВМ № 2009613499; заявл. 19.05.2009 ; зарег. в Реесте программ для ЭВМ 30.06.2009 / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, М. Ю. Нестратов, Н. Н. Нестратов, Н. Н. Потапова, М. М. Степанов, А. Н. Ушаков.
- 1. Kriteriy bezopasnoy ekspluatatsii i koeffitsienty zapasa opolzneopasnykh sklonov / A. N. Bogomolov, O. A. Bogomolova, S. I. Shiyan, A. V. Solov'ev // Zbirnik naukovikh prats'. Ser.: Galuzeve mashinobuduvannya, budivnitstvo. Poltava: [PoltNTU], 2010. Vyp. 3(28). C. 49—54.

- 2. Novyy kriteriy dlitel'noy ustoychivosti odnorodnykh otkosov na osnove analiza napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya / A. N. Bogomolov, M. Yu. Nestratov, A. V. Solov'ev, S. I. Shiyan // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2009. № 14. S. 5—12.
- 3. Opredelenie predel'noy glubiny zalozheniya gorizontal'nykh vyrabotok razlichnogo poperechnogo secheniya / A. N. Bogomolov, O. A. Bogomolova, M. A. Shubin, D. V. Pavlov, M. O. Podlinev, A. V. Solov'ev // Internet-vestnik VolgGASU. Ser.: Politematicheskaya. 2013. Vyp. 2(27). URL: http://vestnik.vgasu.ru/attachments/BogomolovaShubinPavlov PodlinevSolovev-2013\_2(27) (data obrashcheniya: 01.04.2014).
- 4. Ustoychivost' (Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie): svid. o gos. reg. programm dlya EVM № 2009613499; zayavl. 19.05.2009; zareg. v Reeste programm dlya EVM 30.06.2009 / A. N. Bogomolov, O. A. Bogomolova, M. Yu. Nestratov, N. N. Nestratov, N. N. Potapova, M. M. Stepanov, A. N. Ushakov.

© Богомолов А. Н., Подлинев М. О., Павлов Д. В., Богомолов С. А., 2014

Поступила в редакцию в феврале 2014 г.

#### Ссылка для цитирования:

Условия устойчивости горизонтальной выработки, устраиваемой в связном грунте вблизи активной зоны ленточного фундамента / А. Н. Богомолов, М. О. Подлинев, Д. В. Павлов, С. А. Богомолов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 15—23.

УДК 624.131

#### А. Н. Богомолов, А. Н. Ушаков, О. А. Богомолова

# О ФОРМУЛЕ ДЛЯ ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО НОРМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ТОЧКАХ ГРАНИЦЫ БЕСКОНЕЧНОЙ ОДНОСВЯЗНОЙ ОБЛАСТИ

Приводится подробный вывод формулы для вычисления тангенциального нормального напряжения в точках замкнутой границы бесконечной односвязной области, обеспечиваемой отображающей функцией, предложенной профессором В. К. Цветковым.

К лючевые слова: отображающая функция, криволинейная граница бесконечной односвязной области, тангенциальное нормальное напряжение.

The article provides the detailed conclusion of the formula for calculation of tangential normal tension in points of a closed border of the infinite one-coherent area provided by the mapping function, suggested by professor V. K. Tsvetkov.

 $K\,e\,y\,\,$  words: mapping function, curved border of the infinite one-coherent area, tangential normal tension.

В. К. Цветковым [1] предложена функция комплексного переменного

$$z = \omega(\zeta) = i(A\zeta^{-1} + B\zeta + C\zeta^{2} + D\zeta^{3}), \tag{1}$$

где A, B, C, D — действительные коэффициенты, осуществляющие конформное отображение внутренности единичного круга  $|\zeta|<1$  на внешность бесконечной односвязной области, границей которой является простая замкнутая кривая.

Им же получена формула

$$\sigma_{\theta} = \frac{\gamma H (F + G\cos\theta + Q\cos 2\theta)}{K + L\cos\theta + M\cos 2\theta + N\cos 3\theta + R\cos 4\theta},$$
(2)

где

$$F = (1 + \mu)(9D^2 + 4C^2 - A^2) + BS;$$
  
$$G = 2C[(1 + \mu)(B + 6D) + S];$$

$$Q = (1 + \mu)(A + 3D)B + (3D - A)S;$$

$$K = A^2 + B^2 + 4C^2 + 9D^2$$
;  $L = 4C(B+3D)$ ; (3)

$$M = 2B(3D - A);$$

$$N = -4AC$$
:  $R = -6AD$ :

$$S = (A - D)^{-1} [(1 + \mu)(A + D)B - 2(1 - \mu)A^{2}],$$

позволяющая вычислять значения нормального тангенциального напряжения  $\sigma_{\theta}$  в точках, лежащих на этой границе. Однако во всех известных нам работах проф. В. К. Цветкова вывод этой формулы опускается. В силу того, что в нами [2—7] формулы (2), (3) довольно часто используются, считаем необходимым полностью привести вывод формулы (2).

Итак, рассмотрим двухосное сжатие пластинки, ослабленной любыми из отверстий, полученных при помощи отображающей функции (1), усилиями

$$\sigma_x^0 = -p = -\mu \gamma H,$$

$$\sigma_y^0 = -q = -\gamma H,$$
(4)

где H — глубина заложения выработки;  $\mu$  — коэффициент бокового распора;  $\gamma$  — удельный вес пород.

Для нахождения компоненты тангенциального нормального напряжения необходимо определить функцию комплексного переменного

$$\varphi(\zeta) = \varphi_1(\zeta) + \varphi_0(\zeta),\tag{5}$$

где  $\phi_1(\zeta)$  соответствует напряженному состоянию в ненарушенном выработкой массиве горных пород, а  $\phi_0(\zeta)$  определяет дополнительную компоненту напряжения, вызванную наличием выработки.

Согласно [8, с. 95, II.84], с учетом (4) имеем

$$\varphi_1(\zeta) = -\frac{p+q}{4} \Big( A\zeta^{-1} + B\zeta + C\zeta^2 + D\zeta^3 \Big). \tag{6}$$

Перейдем к получению выражения для  $\phi_0(\zeta)$ . Для этого рассмотрим граничное условие [8, с. 60, II.6], т. е.

$$\varphi_0(\zeta) + \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{\omega(\sigma)}{\omega'(\sigma)} \overline{\varphi_0'(\sigma)} \frac{d\sigma}{\sigma - \zeta} + \overline{b_0} = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{f_1^0 + i f_2^0}{\sigma - \zeta} d\sigma. \tag{7}$$

Так как функция  $\phi_0(\zeta)$  голоморфна в круге  $|\zeta| < 1$ , то примем

$$\varphi_0(\zeta) = a_1 i \zeta + a_2 i \zeta^2 + \dots \tag{8}$$

Тогда

$$\overline{\varphi_0} \left( \frac{1}{\zeta} \right) = -a_1 i - 2a_2 i \frac{1}{\zeta} - 3a_2 i \frac{1}{\zeta^2} \dots$$
 при  $|\zeta| > 1$ . (9)

Далее

$$\frac{\omega(\sigma)}{\overline{\omega'(\sigma)}} = -\sigma \frac{A + B\sigma^2 + C\sigma^3 + D\sigma^4}{-A\sigma^4 + B\sigma^2 + 2C\sigma + 3D}.$$
 (10)

Данная функция голоморфна во внешности единичного круга  $|\zeta| > 1$ , за исключением точки  $\zeta = \infty$ . Заметим, что знаменатель дроби не имеет в этой области нулей, что следует из условия конформности отображающей функции (1).

Тогда, с учетом (9) и (10), имеем

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{\omega(\sigma)}{\overline{\omega'(\sigma)}} \overline{\varphi'_0(\sigma)} \frac{d\sigma}{\sigma - \zeta} = -\frac{i}{A} \left( Ca_1 + 2Da_2 + Da_1 \zeta \right). \tag{11}$$

Перейдем к вычислению интеграла, стоящего в правой части граничного условия (7). Согласно [8, с. 95] заметим, что

$$\begin{aligned} f_1^0 + if_2^0 &= \frac{1}{2} \Big[ (p+q)\omega(\sigma) + (q-p)\overline{\omega(\sigma)} \Big] = \\ &= \frac{i}{2} \Big[ (p+q) \Big( A\sigma^{-1} + B\sigma + C\sigma^2 + D\sigma^3 \Big) - (q-p) \Big( A\sigma + B\sigma^{-1} + C\sigma^{-2} + D\sigma^{-3} \Big) \Big]. \end{aligned}$$

Тогда

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{f_1^0 + i f_2^0}{\sigma - \zeta} d\sigma = \frac{i}{2} \Big[ \Big( (p+q)B - (q-p)A \Big) \zeta + (p+q)(C\zeta^2 + D\zeta^3) \Big]. \tag{12}$$

Подставляя значения интегралов (11), (12) в граничное условие (7) и приравняв коэффициенты при одинаковых степенях  $\zeta$ , получим

$$a_{1} = \frac{1}{2} \frac{A}{A - D} ((p + q)B - (q - p)A),$$

$$a_{2} = \frac{1}{2} (p + q)C,$$

$$a_{3} = \frac{1}{2} (p + q)D,$$

$$a_{4} = a_{5} = \dots = 0.$$

Таким образом, с учетом приведенных выше формул получаем

$$\varphi_0(\zeta) = \frac{\gamma H i}{2} \left\{ \frac{A}{A - D} \left[ \left( 1 + \mu \right) B - \left( 1 - \mu \right) A \right] \zeta + \left( 1 + \mu \right) \left( C \zeta^2 + D \zeta^3 \right) \right\}. \tag{13}$$

$$\varphi_{1}(\zeta) = -\frac{\gamma H i}{4} (1 + \mu) \Big( A \zeta^{-1} + B \zeta + C \zeta^{2} + D \zeta^{3} \Big). \tag{14}$$

Для нахождения компоненты тангенциального нормального напряжения воспользуемся хорошо известным соотношением [9]

$$\sigma_{\rho} + \sigma_{\theta} = 4 \operatorname{Re} \Phi(\zeta), \tag{15}$$

где

$$\Phi(\zeta) = \frac{\varphi'(\zeta)}{\omega'(\zeta)}.\tag{16}$$

Вычисляем соответствующие производные функций и подставляем их в соотношения (15) и (16). Тогда соотношение (15) примет вид

$$\sigma_{\rho} + \sigma_{\theta} = 4 \operatorname{Re} \Phi(\zeta) = \frac{-\gamma H (1 + \mu)(-A + B\zeta^{2} + 2C\zeta^{3} + 3D\zeta^{4})}{-A + B\zeta^{2} + 2C\zeta^{3} + 3D\zeta^{4}} + \frac{2\gamma H \left\{ \frac{A}{A - D} \left[ (1 + \mu)B - (1 - \mu)A \right] \zeta^{2} + (1 + \mu) \left( 2C\zeta^{3} + 3D\zeta^{4} \right) \right\}}{-A + B\zeta^{2} + 2C\zeta^{3} + 3D\zeta^{4}}.$$
(17)

Положим  $\zeta = e^{i\theta} = \cos\theta + i\sin\theta$ . Выделим в знаменателе дроби действительную и мнимую части. Умножив полученное выражение на комплексно сопряженное ему, получим выражение, принимающее действительные значения, т. е.

$$A^{2} + B^{2} + 4C^{2} + 9D^{2} + 4C(B+3D)\cos\theta + 2B(3D-A)\cos2\theta - 4AC\cos3\theta - 6AD\cos4\theta.$$

Обозначая коэффициенты при косинусах через K, L, M, N, R, получим выражение, стоящее в знаменателе формулы (17).

Для получения числителя формулы (16) соберем свободные члены в числителе (17), и после умножения его на выражение, комплексно-сопряженное знаменателю дроби (17), получим

$$-(1+\mu)(A^{2}+B^{2}+4C^{2}+9D^{2})+\frac{2AB}{A-D}[(1+\mu)B-(1-\mu)A]+$$

$$+8(1+\mu)C^{2}+18(1+\mu)D^{2}=$$

$$=(1+\mu)(9D^{2}+4C^{2}-A^{2})+B\left\{\frac{A}{A-D}[(1+\mu)(A+D)B-2(1-\mu)A^{2}]\right\}=$$

$$=(1+\mu)(9D^{2}+4C^{2}-A^{2})+BS,$$

где

$$S = \frac{1}{A - D} \Big[ (1 + \mu) (A + D) B - 2 (1 - \mu) A^{2} \Big].$$

Таким образом,

$$F = (1 + \mu)(9D^2 + 4C^2 - A^2) + BS.$$

Аналогично коэффициенты при  $\cos\theta$ ,  $\cos 2\theta$ ,  $\cos 3\theta$ ,  $\cos 4\theta$  будут соответственно равны  $2C[(1+\mu)(B+6D)+S]$ ,  $(1+\mu)(A+3D)B+(3D-A)S$ , 0, 0. Тогда

$$G = 2C[(1 + \mu)(B + 6D) + S];$$

$$Q = (1 + \mu)(A + 3D)B + (3D - A)S$$
.

Замечая, что контур отверстия свободен от внешних напряжений, т. е.  $\sigma_{\rho} = 0$ , из (13) получаем формулу (15) при соотношениях (16).

Подставляя в формулу (15) выражения (3), (9), (13), (14) и (1), полагая  $\zeta = e^{i\theta}$ , после преобразований получаем формулу для определения тангенциальных нормальных напряжений в контурных точках отверстий, свободных от нагрузок,

$$\sigma_{\theta} = \frac{\gamma H (F + G\cos\theta + Q\cos 2\theta)}{K + L\cos\theta + M\cos 2\theta + N\cos 3\theta + R\cos 4\theta},$$
(18.2)

где

$$F = (1 + \mu)(9D^{2} + 4C^{2} - A^{2}) + BS;$$

$$G = 2C[(1 + \mu)(B + 6D) + S];$$

$$Q = (1 + \mu)(A + 3D)B + (3D - A)S;$$

$$K = A^{2} + B^{2} + 4C^{2} + 9D^{2}; L = 4C(B + 3D);$$

$$M = 2B(3D - A);$$

$$N = -4AC; R = -6AD;$$

$$S = (A - D)^{-1}[(1 + \mu)(A + D)B - 2(1 - \mu)A^{2}].$$
(19.2)

Полученные формулы (18.2) и (19.2) полностью совпадают с формулами для тангенциального нормального напряжения (2) и приведенными в работе [1].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Цветков В. К.* Определение форм сечения горных выработок с заданными напряжениями на их контурах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1986. № 2. С. 24—29.
- 2. Постановка задачи о «восстановлении сечения контура» подземной выработки / А. Н. Богомолов, А. Н. Ушаков, Д. В. Павлов, М. О. Подлинев, А. В. Прокопенко // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: материалы Всерос. научн.-техн. конф. с международным участием «Геонауки-2013: Актуальные проблемы изучения недр». Вып. 13. Иркутск: ИГТУ, 2013. С. 381—385.
- 3. Анализ напряженного состояния грунтового массива, вмещающего подземные пространства различной конфигурации / А. Н. Богомолов, С. В. Кузнецова, В. Н. Синяков, М. А. Шубин, В. П. Дыба, Г. М. Скибин, Ю. И. Олянский, О. А. Богомолова, А. Н. Ушаков // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строит. информатика. 2012. Вып. 8 (24). URL: http://vestnik.vgasu.ru/attachments/2\_Bogomolov-2012\_8(24).pdf
- 4. Отыскание рационального контура подземной выработки на основе условия прочности Кулона / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, А. Н. Ушаков, М. О. Подлинев, Д. В. Павлов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 20—26.
- 5. 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). URL: http://vestnik.vgasu.ru/attachments/BogomolovBogomolovaShubinPavlovPodlinevSolovev-2013\_2(27).pdf
- 6. Пример определения безопасной глубины заложения горизонтальной выработки сложного сечения / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, С. Л. Ше[о]лудько, А. В. Соловьев // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 33(52). С. 6—12.
- 7. Задача об отыскании рациональной формы свода горизонтальной подземной выработки / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, А. Н. Ушаков, М. О. Подлинев, Д. В. Павлов, А. В. Прокопенко // Сб. науч. тр., посвящ. 80-летию К. Ш. Шадунца «Инженерные подходы к решению геотехнических задач». Краснодар: КГАУ, 2013. С. 9—21.
- 8. Савин Г. Н. Распределение напряжений около отверстий. Киев: Наукова думка, 1968.
- 9. *Мусхелишвили Н. И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. С. 179—180.
- 1.  $Tsvetkov\ V.\ K.$  Opredelenie form secheniya gornykh vyrabotok s zadannymi napryazheniyami na ikh konturakh // Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh. 1986. N 2. S. 24—29.

- 2. Postanovka zadachi o «vosstanovlenii secheniya kontura» podzemnoy vyrabotki / A. N. Bogomolov, A. N. Ushakov, D. V. Pavlov, M. O. Podlinev, A. V. Prokopenko // Geologiya, poiski i razvedka poleznykh iskopaemykh i metody geologicheskikh issledovaniy: materialy Vseros. nauchn.-tekhn. konf. s mezhdunarodnym uchastiem «Geonauki-2013: Aktual'nye problemy izucheniya nedr». Vyp. 13. Irkutsk: IGTU, 2013. S. 381—385.
- 3. Analiz napryazhennogo sostoyaniya gruntovogo massiva, vmeshchayushchego podzemnye prostranstva razlichnoy konfiguratsii / A. N. Bogomolov, S. V. Kuznetsova, V. N. Sinyakov, M. A. Shubin, V. P. Dyba, G. M. Skibin, Yu. I. Olyanskiy, O. A. Bogomolova, A. N. Ushakov // Internet-vestnik VolgGASU. Ser.: Stroit. informatika. 2012. Vyp. 8 (24). URL: http://vestnik.vgasu.ru/attachments/2\_Bogomolov-2012\_8(24).pdf
- 4. Otyskanie ratsional'nogo kontura podzemnoy vyrabotki na osnove usloviya prochnosti Kulona / A. N. Bogomolov, O. A. Bogomolova, A. N. Ushakov, M. O. Podlinev, D. V. Pavlov // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2014. Vyp. 35(54). S. 20—26.
- 5. Opredelenie predel'noy glubiny zalozheniya gorizontal'nykh vyrabotok razlichnogo poperechnogo secheniya / A. N. Bogomolov, O. A. Bogomolova, M. A. Shubin, D. V. Pavlov M. O. Podlinev, A. V. Solov'ev // Internet-vestnik VolgGASU. Ser.: Politematicheskaya. 2013. Vyp. 2(27). URL: http://vestnik.vgasu.ru/attachments/BogomolovBogomolovaShubinPavlovPodlinevSolovev-2013\_2(27).pdf
- 6. Primer opredeleniya bezopasnoy glubiny zalozheniya gorizontal'noy vyrabotki slozhnogo secheniya / A. N. Bogomolov, O. A. Bogomolova, S. L. She[o]lud'ko, A. V. Solov'ev // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2013. Vyp. 33(52). S. 6—12.
- 7. Zadacha ob otyskanii ratsional'noy formy svoda gorizontal'noy podzemnoy vyrabotki / A. N. Bogomolov, O. A. Bogomolova, A. N. Ushakov, M. O. Podlinev, D. V. Pavlov, A. V. Prokopenko // Sb. nauch. tr., posvyashch. 80-letiyu K. Sh. Shaduntsa «Inzhenernye podkhody k resheniyu geotekhnicheskikh zadach». Krasnodar: KGAU, 2013. S. 9—21.
  - 8. Savin G. N. Raspredelenie napryazheniy okolo otverstiy. Kiev: Naukova dumka, 1968. 887 s.
- 9. *Muskhelishvili N. I.* Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti. M.: Nauka, 1966. S. 179—180.

© Богомолов А. Н., Ушаков А. Н., Богомолова О. А., 2014

Поступила в редакцию в феврале 2014 г.

### Ссылка для цитирования:

Богомолов А. Н., Ушаков А. Н., Богомолова О. А. О формуле для тангенциального нормального напряжения в точках границы бесконечной односвязной области // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. унта. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 24—29.

УДК 624.131

#### А. Н. Ушаков

# О РЕГУЛЯРНОСТИ ОТОБРАЖАЮЩЕЙ ФУНКЦИИ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ДЛЯ АНАЛИЗА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОКРУГ ВНУТРЕННЕЙ ГРАНИЦЫ ОДНОСВЯЗНОЙ БЕСКОНЕЧНОЙ ОБЛАСТИ

Получено условие, при выполнении которого рассматриваемая отображающая функция совершает конформное отображение внутренности (внешности) единичного круга на бесконечную односвязную область с отверстием, форма которого определяется численными значениями ее коэффициентов. Определены условия, позволяющие получать отверстия, формы которых таковы, что кривые, являющиеся границами этих отверстий, не содержат особых точек. Полученные в работе условия регулярности отображающей функции иллюстрированы примерами.

К л ю ч е в ы е с л о в а: отображающая функция, односвязная бесконечная область, конформное отображение, условия регулярности функции.

The condition, under which the considered displaying function produces conformal display of an interior (exterior) of a single circle to infinite simply connected region with a hole, the form of which is defined by numerical values of its coefficients, is obtained. The author finds the conditions, allowing to receive holes with such forms that the curves, which are the borders of these holes, do not have special points. The received conditions of regularity of displaying function are illustrated with the examples.

 $K\,e\,y\,$  w o r d s: displaying function, simply connected infinite region, conformal display, conditions of function regularity.

Производство подземного строительства и добыча полезных ископаемых приводят к необходимости исследования напряженного состояния горного массива, ослабленного подземными выработками различной конфигурации. При этом весьма важную роль играет определение рациональных геометрических параметров этих выработок. Полагая массив горных пород однородным и линейно деформируемым, для исследования напряженного состояния такого массива можно использовать методы линейной теории упругости [1].

Особенно эффективными являются методы теории функций комплексного переменного, позволяющие при помощи функции, осуществляющей конформное отображение внутренности (внешности) единичного круга на односвязную область с внутренней границей, рассматривать подземные выработки с различной формой поперечного сечения.

С этой целью В. К. Цветковым [2] предложена функция комплексного переменного

$$z = \omega(\zeta) = i\left(A\zeta^{-1} + B\zeta + C\zeta^2 + D\zeta^3\right),\tag{1}$$

где A, B, C, D — действительные числа, осуществляющие конформное отображение внутренности единичного круга  $|\zeta| < 1$  на внешность бесконечной односвязной области, внутренней границей которой является простая замкнутая кривая.

В зависимости от значений коэффициентов, входящих в функцию (1), эта кривая может иметь вид трапеции, треугольника, ромба и других геометрических фигур, имитирующих формы сечений горных выработок. При помощи

функции (1) В. К. Цветковым рассмотрены задачи о нахождении возможных форм сечений подземных выработок с наперед заданными значениями тангенциальных нормальных напряжений на контурах этих сечений. Заметим, однако, что в [2] автор не приводит ни одного конкретного примера отображающей функции вида (1). Между тем при различных значениях коэффициентов A, B, C, D может быть нарушена конформность отображения (1), граница области может иметь особые точки.

Целью данной работы является исследование поведения отображающей функции (1).

Заметим [3], что функция (1) регулярна в единичном круге за исключением точки  $z_0 = 0$ , в которой эта функция имеет полюс первого порядка. Для того чтобы рассматриваемое отображение было конформным в области  $|\zeta| < 1$ , необходимо и достаточно, чтобы производная от функции (1) в этой области была отлична от нуля. Это означает, что уравнение

$$3D\zeta^4 + 2C\zeta^2 + B\zeta - A = 0 \tag{2}$$

не должно иметь решений внутри единичного круга  $|\zeta|$  < 1 .

Применяя теорему Руше, получим

$$|A| > |B| + 2|C| + 3|D|$$
, если  $A \neq 0$ , (3a)

$$|B| > 2|C| + 3|D|$$
, если  $A = 0$ . (36)

Приведем примеры, иллюстрирующие формулы (3а), (3б).

Пример 1. Пусть отображающая функция (1) имеет вид

$$z = \omega(\zeta) = i(-8\zeta^{-1} - 3.5\zeta + 0.1\zeta^{2} + 0.5\zeta^{3}). \tag{4}$$

Нетрудно проверить, что неравенство (3а) выполняется. Следовательно, функция (4) совершает конформное отображение. Образ единичного круга при таком отображении приведен на рис. 1, a.

Пример 2. Теперь примем

$$z = \omega(\zeta) = i(-30,75\zeta + 8\zeta^2 + 1,25\zeta^3). \tag{5}$$

В этом случае выполняется неравенство (3б). Функция (5) совершает конформное отображение внутренности единичного круга на область, границей которой является контур, приведенный на рис. 1, 6.

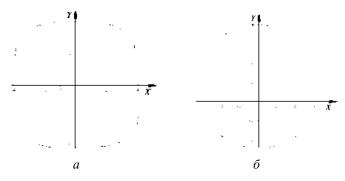


Рис. 1. Криволинейные внутренние границы бесконечных односвязных областей, полученные при рассмотрении примеров 2 и 3 соответственно

## Пример 3. Пусть теперь

$$z = \omega(\zeta) = i(-\zeta^{-1} + 3.76\zeta + 2\zeta^{2} + 0.24\zeta^{3}). \tag{6}$$

В этом случае неравенство (3а) не выполняется, и значит, отображение, совершаемое функцией (6), не является конформным.

Положим  $\zeta = \cos \theta + i \sin \theta$ . Отделяя действительные и мнимые части в (1), получим параметрические уравнения упомянутой выше кривой в виде

$$\begin{cases} x(\theta) = (A - B)\sin\theta - C\sin 2\theta - D\sin 3\theta; \\ y(\theta) = (A + B)\cos\theta + C\cos 2\theta + D\cos 3\theta. \end{cases}$$
 (7)

Проведем исследование кривых (7) на регулярность.

Функции  $x(\theta)$  и  $y(\theta)$  определены для всех значений параметра  $\theta$  и дифференцируемы во всех точках. Для нахождения особых точек кривой необходимо найти те значения параметра  $\theta$ , при которых выполняется условие

$$\begin{cases} x'_{\theta} = 0, \\ y'_{\theta} = 0. \end{cases}$$

$$\tag{8}$$

Дифференцируя (7) и преобразовывая полученные выражения для производных, перепишем условие (8) в виде

$$\begin{cases} 12D\cos^{3}\theta + C\cos^{2}\theta - (A - B + 9D)\cos\theta + C = 0, \\ \sin\theta(12D\cos^{2}\theta + 4C\cos\theta + A + B - 3D) = 0, \end{cases}$$
(8')

где  $0 \le \theta < 2\pi$ .

Проиллюстрируем условие (8') на примерах.

Пример 4. Рассмотрим кривую, заданную уравнениями

$$\begin{cases} x(\theta) = -7 \sin \theta - 0.7 \sin 2\theta - 0.6 \sin 3\theta; \\ y(\theta) = -7.6 \cos \theta + 0.7 \cos 2\theta + 0.6 \cos 3\theta, \end{cases}$$
(9)

и определим ее особые точки (если они имеются).

Сравнивая (9) и (7), нетрудно видеть, что A = -7.3, B = -0.3, C = 0.7, D = 0.6. Подставляя данные коэффициенты в систему (8'), замечаем, что эта система решений не имеет. Следовательно, на контуре (9) нет особых точек (рис. 2, a).

Пример 5. Рассмотрим кривую, заданную уравнениями

$$\begin{cases} x(\theta) = 0.75 \sin \theta - 0.25 \sin 3\theta; \\ y(\theta) = 0.75 \cos \theta + 0.25 \cos 3\theta, \end{cases}$$
 (10)

и определим ее особые точки (если они имеются).

Тогда, сравнивая (10) и (7), имеем A=0,75, B=C=0, D=0,25. Подставляя данные коэффициенты в систему (8´), легко получаем значения параметров:  $\theta_1=0, \theta_2=\pi/2, \theta_3=\pi, \theta_4=3\pi/2$ , при которых имеем четыре особые точки:  $M_1=(0,1), M_2=(-1,0), M_3=(0,-1), M_4=(1,0)$ , являющиеся точками возврата (рис.  $2, \delta$ ).

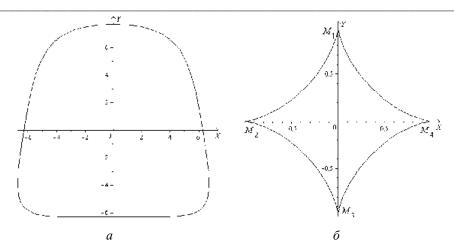


Рис. 2. Криволинейные внутренние границы бесконечных односвязных областей, полученные при рассмотрении примеров 4 и 5 соответственно

Кривые, описываемые уравнениями (7), могут иметь точки самопересечения. Поскольку, в силу (7), все контуры являются кривыми, симметричными относительно оси OY, то точки самопересечения могут находиться как на самой оси ординат, так и вне ее, причем они будут симметричными относительно оси OY. Условия самопересечения, как известно, имеют вид

$$\begin{cases} x(\theta_1) = x(\theta_2), \\ y(\theta_1) = y(\theta_2), \end{cases} \theta_1 \neq \theta_2, \tag{11}$$

где

$$0 < \theta_1 < 2\pi, \ 0 < \theta_2 < 2\pi,$$
 (12)

причем для точек, находящихся на оси OY, условия (11) упрощаются и принимают вид

$$\begin{cases} x(\theta) = 0, \\ y(\theta) = y_0, \end{cases}$$
 (13)

где  $y_0$  — значения ординаты при найденных из первого условия значениях аргумента  $\theta$ .

Соотношения (11) при условии (7) принимают вид

$$\begin{cases} (A-B)\sin\theta_{1} - C \sin 2\theta_{1} - D\sin 3\theta_{1} = (A-B)\sin\theta_{2} - C\sin 2\theta_{2} - D\sin 3\theta_{2}, \\ (A+B)\cos\theta_{1} + C \cos 2\theta_{1} + D\cos 3\theta_{1} = (A+B)\cos\theta_{2} + C\cos 2\theta_{2} + D\cos 3\theta_{2}. \end{cases}$$
(14)

Положим

$$\frac{\theta_1 - \theta_2}{2} = a, \ \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} = b.$$
 (15)

Тогда решение системы уравнений (14) при  $C \neq 0$  сводится к последовательному решению следующих трех уравнений:

$$\frac{256A^2D}{C^2}x^4 - \frac{64AD}{C^2}(7A + 2B)x^3 + \left(\frac{16D}{C^2}(2A + B)(8A + B) + 16A\right)x^2 - 4\left(4A + B + D + \frac{3D}{C^2}(2A + B)^2\right)x + 3(A + B + D) = 0,$$
(16)

$$x = \cos^2 b \,, \tag{17}$$

$$\cos a = \frac{\cos b(2A\cos 2b - B)}{C},\tag{18}$$

а при C = 0 — к решению двух уравнений:

$$\cos 2b = \frac{B}{2A},$$

$$\cos^2 a = \frac{(A-B)\cos b + D\cos 3b}{4D\cos 3b}.$$

Из соотношений (15) имеем

$$\theta_1 = b + a, \, \theta_2 = b - a, \tag{19}$$

и отбираем только те значения аргументов, которые удовлетворяют условиям (12). При этом аргументы точек пересечения, симметричных относительно оси ординат, находятся из следующих соотношений:

$$\theta_3 = 2\pi - \theta_2, \ \theta_4 = 2\pi - \theta_1.$$

Условие (13) сводится к простейшему уравнению второго порядка

$$4D\cos^2\theta + 2C\cos\theta - (A - B + D) = 0, (20)$$

решения которого, как и выше, отбираем из интервала  $0 < \theta < 2\pi$ .

Заметим, что нас интересует наличие точек самопересечения, а не величины их аргументов. В качестве значений a и b будем брать наименьшие положительные значения решений уравнений (17) и (18). При этом необходимо убедиться в наличии или отсутствии решений уравнения (20), причем желательно начинать проверку кривых (7) на наличие точек самопересечения с решения уравнения (20) как наиболее простого. Проиллюстрируем сказанное на примерах.

Пример 6. Рассмотрим кривую, заданную уравнениями

$$\begin{cases} x(\theta) = -0.5\sin\theta - \sin 2\theta - 0.5 \sin 3\theta; \\ y(\theta) = -3.5\cos\theta + \cos 2\theta + 0.5 \cos 3\theta. \end{cases}$$
 (21)

Тогда A=-2, B=-1,5, C=1, D=0,5. Уравнение (20) принимает вид  $\cos^2\theta+\cos\theta=0$  и дает значения аргумента  $\theta_1=\pi/2$ ,  $\theta_2=3\pi/2$ . Это и есть значения аргументов точек самопересечения, лежащих на оси ординат. Таким образом, кривая (21) (рис. 3, a) имеет точки самопересечения, и дальнейшая проверка, связанная с решением уравнений (16)—(18), необязательна.

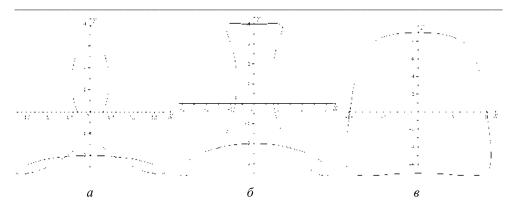


Рис. 3. Криволинейные внутренние границы бесконечных односвязных областей, полученные при рассмотрении примеров 6—8 соответственно

# Пример 7. Рассмотрим кривую, заданную уравнениями

$$\begin{cases} x(\theta) = -2\sin\theta - \sin 2\theta - \sin 3\theta; \\ y(\theta) = -4\cos\theta + \cos 2\theta + \cos 3\theta. \end{cases}$$
 (22)

Ясно, что A = -3, B = -1, C = 1, D = 1. Тогда уравнение (20) принимает вид

$$4\cos^2 \theta + 2\cos \theta + 1 = 0$$
.

Это уравнение имеет решения, однако они отличаются друг от друга более чем на  $2\pi$ . Следовательно, точек самопересечения на оси ординат кривая (22) не имеет. Переходим к анализу уравнений (16)—(18).

Уравнение (16) имеет вид

$$2304x^4 - 4416x^3 + 2752x^2 - 540x - 9 = 0$$

и на интервале 0 < x < 1 имеет решения

$$x_1 = 0.483$$
,  $x_2 = 0.699$ ,  $x_3 = 0.75$ .

Выбирая первый из корней, рассмотрим наименьшие положительные решения уравнений (17) и (18), а именно  $b_1 = 0,802, a_1 = 0,584$ . Подставляя полученные значения в (19), имеем  $\theta_1 = 1,386, \theta_2 = 0,218$ . Значит, имеется хотя бы одна точка самопересечения, расположенная вне оси ординат (см. рис.  $3, \delta$ ).

# Пример 8. Рассмотрим кривую, заданную уравнениями

$$x(\theta) = -11\sin\theta - \sin 2\theta - \sin 3\theta;$$
  

$$y(\theta) = -9\cos\theta + \cos 2\theta + \cos 3\theta.$$
(23)

Имеем A = -10, B = 1, C = 1, D = 1. Уравнение (20) принимает вид

$$2\cos^2\theta + \cos\theta + 5 = 0$$
.

Данное уравнение решений не имеет, поэтому точек самопересечения на оси ординат нет. Рассмотрим уравнения (16)—(18) для условий данного примера.

Уравнение (16) имеет вид

$$25600x^4 - 43520x^3 + 23856x^2 - 4180x - 24 = 0$$

и на интервале 0 < x < 1 имеет решения

$$x_1 = 0.418$$
,  $x_2 = 0.538$ ,  $x_3 = 0.75$ ,

а уравнения (17) и (18) принимают, соответственно, вид

$$\cos^2 b = 0.418, \cos a = 1.476;$$
  
 $\cos^2 b = 0.538, \cos a = -1.837;$  (24)

$$\cos^2 b = 0.75$$
,  $\cos a = -9.526$ .

Ясно, что ни одна из пар соотношений (24) решений не имеет. Таким образом, кривая (23) не имеет точек самопересечения (см. рис. 3, 6).

#### Выводы.

- 1. Получено условие, при выполнении которого рассмотренная функция (1) совершает конформное отображение внутренности (внешности) единичного круга на бесконечную односвязную область с отверстием, форма которого определяется численными значениями ее коэффициентов.
- 2. Определены условия, позволяющие получать отверстия, формы которых таковы, что кривые, являющиеся границами этих отверстий, не содержат особых точек.
- 3. Полученные в работе условия регулярности иллюстрированы примерами.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Xан X. Теория упругости: Основы линейной теории и ее применения. М. : Мир, 1988. 344 с.
- 2. *Цветков В. К.* Определение форм сечений горных выработок с заданными напряжениями на контурах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1986. № 2. С. 24—29.
- 3. Сидоров Ю. В., Федюк М. В., Шабунин М. И. Лекции по теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1989. 480 с.
  - 1. Khan Kh. Teoriya uprugosti: Osnovy lineynoy teorii i ee primeneniya. M.: Mir, 1988. 344 c.
- 2. *Tsvetkov V. K.* Opredelenie form secheniy gornykh vyrabotok s zadannymi napryazheniyami na konturakh // Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh. 1986. № 2. S. 24—29.
- 3. Sidorov Yu. V., Fedyuk M. V., Shabunin M. I. Lektsii po teorii funktsiy kompleksnogo peremennogo. M.: Nauka, 1989. 480 c.

© Ушаков А. Н., 2014

Поступила в редакцию в апреле 2014 г.

### Ссылка для цитирования:

 $Ушаков \ A.\ H.\ O$  регулярности отображающей функции, используемой для анализа напряженного состояния вокруг внутренней границы односвязной бесконечной области // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 30—36.

УДК 624.1

# Г. М. Скибин, В. П. Дыба, А. М. Кидакоев

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ СМЕШАННОЙ ЗАДАЧИ О НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ ОСНОВАНИЯ ЛЕНТОЧНЫХ ФУНДАМЕНТОВ

Выполнено сравнение экспериментальных данных с результатами теоретического решения смешанной упругопластической задачи для оснований ленточных фундаментов. Приведены результаты информационного моделирования с помощью программного комплекса «ЛЕНТА» с целью изучения распределения компонент напряженного состояния и осадок песчаного основания.

Ключевые слова: ленточный фундамент, песчаное основание, эксперимент, напряженно-деформированное состояние, результаты.

The authors compare the experimental data with the results of theoretical solutions of mixed elastoplastic problems for the grounds of strip foundations. The results of information modeling using program complex "LENTA" in order to learn the distribution of the component of stress state and sandy grounds are given.

Key words: strip foundation, sandy ground, experiment, stress-strain state, results.

Расчетная схема основания при действии полосовой нагрузки в условиях плоской деформации показана на рис. 1 (приращения напряжений на схеме условно не показаны).

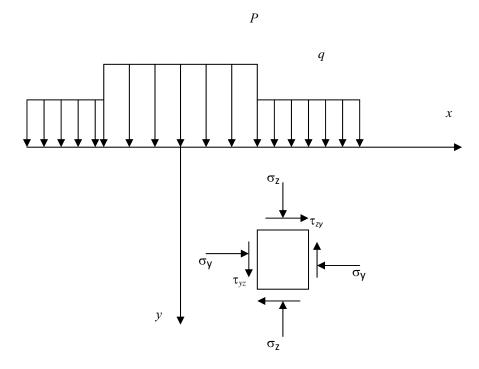


Рис. 1. Расчетная схема основания при действии полосовой нагрузки

Для элементарного объема грунта, расположенного в точке M, запишем условия равновесия

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{ezz}}{\partial y} = 0, 
\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{ezz}}{\partial z} = 0.$$
(1)

В уравнения (1) входят неизвестные компоненты напряжений  $\sigma_z$ ,  $\sigma_y$  и  $\tau_{zy}$ . В качестве третьего уравнения примем условие совместности деформаций для упругих областей основания

$$\nabla^2 \left( \sigma_z + \sigma_y \right) = 0, \tag{2}$$

или условие предельного равновесия по теории прочности Кулон — Мора для областей основания, находящихся в пластическом состоянии,

$$\frac{\left(\sigma_z - \sigma_y\right)^2 + 4\tau_{yz}^2}{\left(\sigma_z + \sigma_y + 2cctg(\varphi)\right)^2} = \sin^2(\varphi). \tag{3}$$

Уравнения (1)—(3) относятся к смешанной задаче теории упругости и теории пластичности грунтов. Аналитическое решение этой задачи для условий плоской деформации и невесомой среды получено Ю. Н. Мурзенко [1] с использованием в качестве базовых решений В. В. Соколовского и И. В. Федорова [2, 3].

Осадка упругопластического основания по решению [1] определяется по следующей формуле:

$$s = \frac{3}{8\overline{E}} \sum_{1}^{k} \frac{h_i}{E_i} \left[ \left( \sigma_z - \sigma_y \right)_i + \left( \sigma_z - \sigma_y \right)_{i+1} \right], \tag{4}$$

где  $\sigma_z$  и  $\sigma_y$  — компоненты напряжений на границах элементарных слоев грунта;  $h_i$  — толщина элементарного слоя грунта; E — начальное значение модуля деформации грунта;  $\overline{E}$  — безразмерная функция изменения модуля деформации грунта с ростом нагрузки, определяемая по соответствующему закону деформирования из экспериментальных данных.

Сложность поведения основания при упругопластических деформациях возможно более полно представить информационным моделированием, в котором сочетаются численное и графическое моделирование. Объем вычислительных операций в реализации расчетных упругопластических моделей оснований столь велик, что данная информация была ранее малодоступна исследователю, а визуализация происходящих в изучаемой среде процессов (эпюры, графики, изолинии) стала доступной лишь с появлением мощных современных компьютеров.

Теоретические основы алгоритма ПК «ЛЕНТА» разработаны Ю. Н. Мурзенко и изложены в [1]. Алгоритм программного комплекса разработан Ю. Н. Мурзенко, В. В. Шматковым и С. К. Климовым [4]. Как следует из [4], данный комплекс предназначен для решения следующих задач:

- 1) расчета нелинейно-деформируемого основания ленточных фундаментов при действии заданной расчетной нагрузки с вычислением и построением компонент НДС грунта и значения осадки основания (ветвь «Расчет»);
- 2) информационного моделирования развития НДС грунта в основании ленточного фундамента при последовательном развитии упругопластических деформаций в грунте при ступенчато возрастающей нагрузке (ветвь «Анализ»);
- 3) расчета основания по деформациям. Осуществляется путем вывода на дисплей и исследования графиков осадок основания при различных методиках проектирования. Эти графики являются результатами решения нелиненых задач НДС основания для соответствующих исходных данных и интегрально отражают деформации оснований рассчитываемых сечений в полном интервале нагрузок.

С целью экспериментального обоснования данного теоретического решения приведено сравнение результатов опытов с данными, полученными по ветви «Анализ» программного комплекса «ЛЕНТА» для песчаного основания нагруженного ленточным фундаментом шириной 18 см на ступенях нагружения, близких к экспериментальным. Следует отметить, что для количественного сопоставления результатов информационного моделирования с экспериментальными данными прочностные характеристики  $\varphi$ , c и удельный вес исследуемого основания (песок) приняты такими, чтобы значения предельных нагрузок, полученных в экспериментах и в результате выполнения программы, были близки. При этом  $-\gamma = 17.4 \text{ кH/m}^3$ ,  $\varphi = 40.5^\circ$  и c = 5.2 кПа, что не противоречит и данным действующих норм [5].

В ходе экспериментальных исследований проведена серия опытов с целью изучения напряженного состояния песчаного основания ленточного фундамента.

Полосовая нагрузка от ленточного фундамента моделировалась тремя жесткими шероховатыми (шероховатость подошвы обеспечивалась наклеенной на нее наждачной бумагой ) штампами размером в плане  $180 \times 700$  мм, расположенными по длине с зазором 5 мм, таким образом получена полоса  $180 \times 2110$  мм, в которой соотношение l/b = 11,7 > 5 соответствует, согласно исследованиям [6], условию постановки плоской задачи. Схема приложения полосовой нагрузки на основание показана на рис. 2.

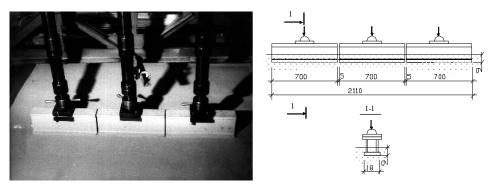


Рис. 2. Схема нагружения основания полосовой нагрузкой

Подготовка к опытам проводилась в следующей последовательности. В лотке машины МФ-1 отрывался прямоугольный котлован на всю длину лотка, шириной и глубиной приблизительно равной 1 м, что соответствует  $\sim 5b$ . Затем производилась обратная укладка песка слоями по 6...7 см с тщательным уплотнением и контролем плотности в 10...15 точках каждого слоя, который осуществлялся иглой-плотномером [7].

Установке тензометрических приборов (месдоз) предшествовала срезка верхнего неоднородного по плотности слоя песка толщиной 1...2 см. Срезка производилась специальным шаблоном, который двигался по установленным направляющим. Затем на выровненной поверхности основания с помощью отвеса и направляющей — двигающейся по кромке лотка рейки — отмечались места расположения приборов. Схемы установки приборов в опытах приведены на рис. 3.

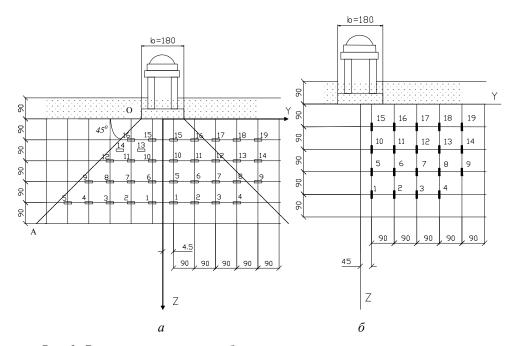


Рис. 3. Схема расположения приборов в экспериментах: a — для измерения  $\sigma_z$ ;  $\delta$  — для измерения  $\sigma_y$ 

Перед установкой штампа производилась срезка лишнего слоя песка, и на полученной таким образом контактной поверхности отмечались оси и границы штампов. Установка штампов производилась поворотным краном. Зазор 5 мм между штампами выдерживался специальными прокладками, которые потом убирались. Боковая пригрузка создавалась слоем песка d=9 см, который насыпался выше контактного слоя, таким образом относительное заглубление составило 0.5b. Одновременно на штампы устанавливались шаровые опоры и выставлялись гидравлические домкраты. Затем устанавливалась траверсная ферма, к которой крепится прогибомер.

Для наглядности на рис. 4, 5, 6 приведены графические результаты информационного и экспериментального моделирования.

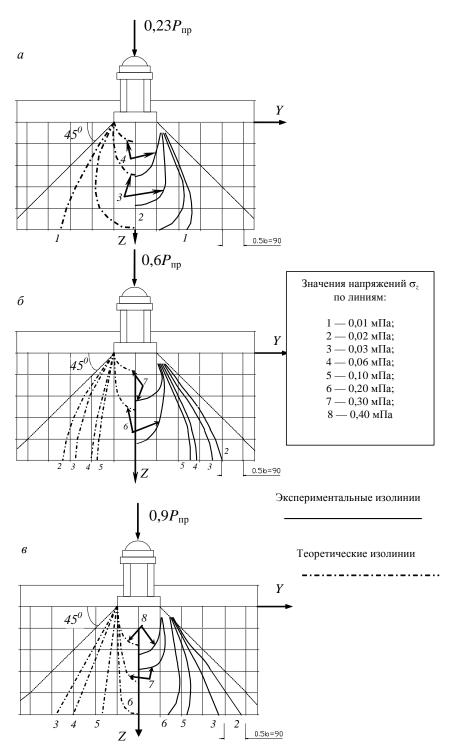
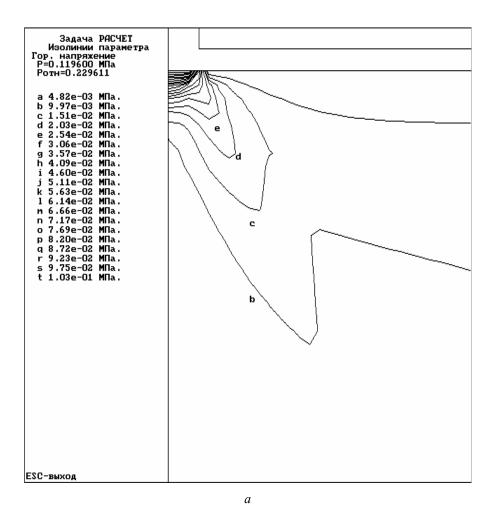


Рис. 4. Изолинии нормальных напряжений  $\sigma_z$ 



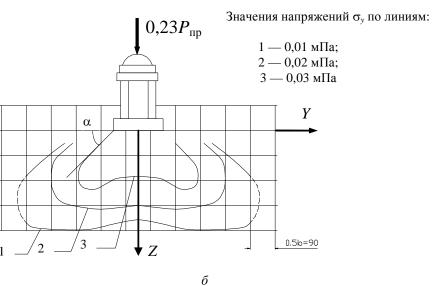


Рис. 5. Изолинии нормальных напряжений  $\sigma_y$  на начальных ступенях: a — теоретические изолинии;  $\delta$  — экспериментальные изолинии

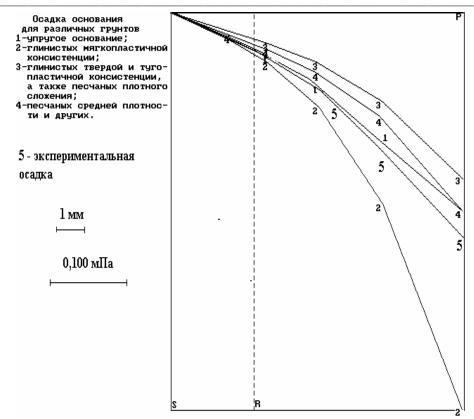


Рис. 6. Совмещенные теоретические и экспериментальные графики зависимости «нагрузка — осадка»

Сравнивая данные компьютерного моделирования с данными экспериментов, следует отметить следующее:

- 1. Сходство по форме и близость кривых 4 и 5 на графике зависимости «нагрузка осадка» (рис. 6) свидетельствует о сходстве процесса упругопластического деформирования основания, реализованного в ПК «ЛЕНТА», с реальным процессом деформирования основания ленточного фундамента в процессе нагружения.
- 2. Изолинии  $\sigma_z$  и  $\sigma_y$ , полученные экспериментально, сходны по форме с теоретическими (рис. 4, 5).
- 3. Теоретические значения  $\sigma_z$  несколько отличаются от экспериментальных, наибольшее отличие отмечено в зоне основания под штампом (рис. 4, a,  $\delta$ ). Однако с ростом нагрузки и эта разница уменьшается, и при достижении нагрузкой значения  $0.9P_{\rm np}$  она незначительна (рис. 4,  $\epsilon$ ).

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Мурзенко Ю. Н.* Расчет оснований зданий и сооружений в упругопластической стадии с применением ЭВМ. Л. : Стройиздат, 1989. 134 с.
- 2. *Соколовский В. В.* О предельном равновесии сыпучей среды // Прикладная математика и механика. Т. XV. Вып. 6. 1951.
- 3. *Федоров И. В.* Некоторые задачи упругопластического распределения напряжений в грунтах, связанные с расчетом оснований // Сборник института механики АН СССР. Т. XXVI. М., 1958. С. 204—215.

- 4. *Мурзенко Ю. Н., Шматков В. В., Климов С. К.* Информационное моделирование упругопластического состояния основания ленточных фундаментов на персональном компьютере // Исследования и разработки по компьютерному проектированию фундаментов и оснований : межвуз. сб. Новочеркасск : НПИ, 1990. С. 8—13.
- 5. Свод правил по проектированию и строительству. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01—83. СП 22.13330.2011. М. : Минрегион России, 2011.
- 6. *Куликов К. К.* Экспериментальные исследования совместной работы плотного песчаного основания и сборных ленточных фундаментов: дис. канд. техн. наук. Новочеркасск, 1969. 203 с.
- 7. *Мурзенко Ю. Н.*, *Борликов Г. М.*, *Дюмин А. А.* Игла-плотномер для измерения плотности песчаного грунта: Тез. докл. XVI науч. конф. НПИ. Новочеркасск, 1965. С. 84—85.
- 1. Murzenko Yu. N. Raschet osnovaniy zdaniy i sooruzheniy v uprugoplasticheskoy stadii s primeneniem EVM. L.: Stroyizdat, 1989. 134 s.
- 2. Sokolovskiy V. V. O predel'nom ravnovesii sypuchey sredy // Prikladnaya matematika i mekhanika. T. XV. Vyp. 6. 1951.
- 3. Fedorov I. V. Nekotorye zadachi uprugoplasticheskogo raspredeleniya napryazheniy v gruntakh, svyazannye s raschetom osnovaniy // Sbornik instituta mekhaniki AN SSSR. T. XXVI. M., 1958. S. 204—215.
- 4. *Murzenko Yu. N., Shmatkov V. V., Klimov S. K.* Informatsionnoe modelirovanie uprugoplasticheskogo sostoyaniya osnovaniya lentochnykh fundamentov na personal'nom komp'yutere // Issledovaniya i razrabotki po komp'yuternomu proektirovaniyu fundamentov i osnovaniy: mezhvuz. sb. Novocherkassk: NPI, 1990. S. 8—13.
- 5. Svod pravil po proektirovaniyu i stroitel'stvu. Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.01—83. SP 22.13330.2011. M.: Minregion Rossii, 2011.
- 6. Kulikov K. K. Eksperimental'nye issledovaniya sovmestnoy raboty plotnogo peschanogo osnovaniya i sbornykh lentochnykh fundamentov: dis. kand. tekhn. nauk. Novocherkassk, 1969. 203 s.
- 7. Murzenko Yu. N., Borlikov G. M., Dyumin A. A. Igla-plotnomer dlya izmereniya plotnosti peschanogo grunta: Tez. dokl. XVI nauch. konf. NPI. Novocherkassk, 1965. S. 84—85.

© Скибин Г. М., Дыба В. П., Кидакоев А. М., 2014

Поступила в редакцию в феврале 2014 г.

# Ссылка для цитирования:

Скибин Г. М., Дыба В. П., Кидакоев А. М. Экспериментальная оценка теоретического решения смешанной задачи о напряженно-деформированном состоянии основания ленточных фундаментов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 37—44.

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 621.315.616.97

М. П. Ганицев, А. И. Рахимов, Т. К. Акчурин

# РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ЭФФЕКТИВНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ГИДРОКСИЛСОДЕРЖАЩИХ СОПОЛИМЕРОВ С ПОЛИИЗОЦИАНАТОМ

Приведены составы и технологии изготовления композиционных материалов с применением отходов нефтеперерабатывающих предприятий и гидроксилсодержащих бутадиеновых каучуков. Проанализировано влияние компонентного состава на физико-механические свойства кровельных и напольных покрытий.

Ключевые слова: полимерная композиция, сополимер, отходы производства.

The authors provide compositions and the technology of production of composite materials using refinery wastes and hydrous butadiene rubbers. They analyze the impact of the component composition of physical and mechanical properties of roof and floor coverings.

Key words: polymer composition, copolymer, industrial wastes.

Актуальной задачей является разработка составов и технологий композиционных материалов, применяемых для защиты различных поверхностей от атмосферных и климатических воздействий на базе промышленных отходов нефтеперерабатывающих предприятий.

Наибольший интерес представляют композиционные материалы с применением сополимеров, полученных из отходов нефтяного пиролиза бензина (так называемых «жидких продуктов пиролиза»). Жидкие продукты пиролиза представляют собой смесь предельных и непредельных углеводородов. При сополимеризации последних получена нефтеполимерная смола — эффективный компонент уретановых композиций. Для получения нефтеполимерной смолы (НПС) нами были использованы жидкие продукты пиролиза (ЖПП) прямогонных бензинов с пределами выкипания 130...190 °C. НПС приготавливали из ЖПП (100 масс. ч.) и 0,5 % масс. пероксида с последующим нагреванием до 130...140 °C в течение 1,5...2 ч (повышение температуры свыше 140 °С приводит к началу закипания реакционной смеси и ухудшению цвета нефтеполимерной смолы). После окончания процесса сополимеризации непредельных соединений, входящих в состав ЖПП, реакционную массу охлаждают до комнатной температуры. Для выделения нефтеполимерной смолы из растворителя, которым является смесь предельных углеводородов, входящих в состав ЖПП, продукт отгоняют под вакуумом 25...30 мм. рт. ст. и температуре 120 °C.

Приготовление образцов проводилось в смесителя ЛМ-1 с мешалкой якорного типа со скоростью вращения 252 об./мин. По окончании процесса смешения смесь наносилась на формы, предварительно покрытые антиадгезивом. Глубина формы составляет 5 мм. О скорости отверждения образцов судили по нарастанию твердости с течением времени.

Твердость отвержденных композиций определяли твердомером ТМ-2 по известной методике [1]. Для испытаний берутся образцы композиций размером не менее  $30 \times 45$  мм для обеспечения полного соприкосновения прибора и образца. Принцип испытания образцов заключается в определении степени погружения иглы прибора в образец под действием тарированной пружины. Для проведения испытания образец помещают на ровную, гладкую поверхность, чтобы исключить влияние перекоса и изгибающих моментов при замере. Измеряется глубина погружения иглы по шкале прибора. Каждый образец испытывается не менее чем в трех местах, и выводится среднее значение.

Композиция для создания покрытий состоит из низкомолекулярного гидроксилсодержащего каучука, отвердителя (ПИЦ), катализатора уретанообразования — ДБДЛО, глицерина и НПС, которая была получена по методике, описанной выше [2].

Физико-механические свойства НПС сопоставимы с известными образцами, полученными каталитическим путем из чистых мономеров в жестких условиях синтеза. НПС далее была использована в качестве наполнителя в рецептурах уретановых композиций [3, 4].

Из низкомолекулярных гидроксилсодержащих каучуков были использованы ПДИ-1К и Krasol LBH 3000. В качестве полиизоцианата в композициях были использованы полиметилен-полифенилизоцианаты на основе 4,4-дифенилметандиизоцианата.

Введение НПС с гидроксильными группами в каучуки приведенных марок способствует повышению степени сшивания получаемых на их основе эластомеров при отверждении ПИЦ, что обеспечивает рост динамических и физико-механических показателей создаваемых покрытий [5, 6].

Основными физико-механическими характеристиками отвержденных композиций являются прочность и относительное удлинение при разрыве.

Определение прочности и относительного удлинения производится на разрывной машине РМИ-60 при скорости движения нижнего зажима 500 мм в минуту в соответствии с требованиями [7].

Образцы для испытаний готовятся в виде двухсторонних лопаток с длиной рабочего участка 25 мм и шириной 6,5 мм. В ходе испытаний снимаются следующие показатели:

усилие при разрыве  $F_{\rm p}$ , кгс;

относительное удлинение при разрыве  $\varepsilon_{\text{отн}}$ , %.

Прочность при разрыве определяется по формуле

$$\sigma_{\rm p} = \frac{F_{\rm p}}{l_{\rm o}h_{\rm o}},$$

где  $l_0$  — ширина рабочего участка, мм;  $h_0$  — толщина рабочего участка, мм. Свойства образцов покрытий приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, добавление НПС в композиции в качестве наполнителя позволяет увеличить физико-механические показатели, такие как твердость по Шору A с 56 до 72 усл. ед., условную прочность с 16 до 27 кгс/см², относительное удлинение с 68 до 140 %, эластичность по отскоку с 40 до 55 %. Оптимальным количеством наполнителя является диапазон 25...40 масс. ч., так как при добавлении 60 масс. ч. происходит некоторое снижение физико-механических показателей образцов покрытий.

Таблица 1 Состав и свойства покрытий

Наименование компонентов	Состав, масс. ч., и свойства							
и показателей	1	2	3	4	5	6		
1. Низкомолекулярный гидро-								
ксилсодержащий каучук:	100	100			100			
ПДИ-1К	100	100	100	100	100	100		
LBH 3000			100	100		100		
2. Низкомолекулярный спирт —								
глицерин	5	4	3	2	4	4		
3. Полиизоцианат	24	22	19	15	20	20		
4. Катализатор уретанообразова-								
ния — ДБДЛО	0,1	0,01	0,1	0,01	0,01	0,1		
5. Нефтеполимерная смола	10	15	25	40	60	_		
6. Твердость по Шору $A$ , у. е.	65	70	72	70	72	56		
7. Условная прочность, кгс/см <sup>2</sup>	18	20	25	27	20	16		
8. Относительное удлинение, %	95	140	110	90	85	68		
9. Эластичность по отскоку, %	40	42	55	53	45	40		

Полученные результаты на данном этапе исследования позволяют судить о преимуществах полученной полимерной композиции с применением в качестве наполнителя нефтеполимерной смолы и таких ингредиентов, как гидроксилсодержащий каучук, глицерин и полиизоцианат.

Также была изучена сополимеризации ЖПП и низкомолекулярного гидроксилсодержащего бутадиенового каучука в среде толуола с целью модификации структуры каучука. Для получения модифицированной нефтеполимерной смолы (МНПС) были использованы ЖПП и гидроксилсодержащий низкомолекулярный бутадиеновый каучук марки ПДИ-1К. Для приготовления МНПС 100 масс. ч. каучука растворяли в таком же количестве толуола [8], а затем дозировали ЖПП в диапазоне от 10 до 100 масс. ч. После перемешивания, обеспечивающего гомогенизацию реакционной смеси, вводили перекисный инициатор (а, а'-диоксибензилпероксид) и нагревали до 110...130 °С в течение 1,5...2 ч. По окончании реакции производили вакуумную отгонку не вступивших в реакцию углеводородов [9].

В качестве каучука был использован сополимер изопрена и бутадиена (соотношение мономеров 20:80, средняя молекулярная масса 3000...3500, содержание гидроксильных групп 0,7...1,1 масс. %), известный под маркой ПДИ-1К [10].

Было установлено, что 7,5...13,9 % толуола расходуется в процесс сополимеризации непредельных компонентов ЖПП с гидроксилсодержащим низкомолекулярным бутадиеновым каучуком ПДИ-1К. Участие толуола можно объяснить схемой, включающей его взаимодействие с радикалами, генерируемыми из пероксида или из мономеров:

Фенильный или гидроксильный радикалы, получаемые при распаде пероксида [11], вступают в реакцию со стиролом, и далее образующиеся бензилзамещенные радикалы присоединяются к циклопентадиену (на схеме «ЦП»). Полученный радикал взаимодействует с гидроксилсодержащим каучуком (на схеме «ГК»), а затем возможен обрыв цепи при взаимодействии с бензильным радикалом (легко генерируется из толуола при реакции с любым радикалом, указанным в схеме) [12].

Полученые МНПС с количественным выходом обладают следующими свойствами: температура размягчения по КиШ 107...112 °C; йодное число 61...63 г йода/100 г продукта [12].

Композиции, включающие в качестве основы МНПС, ПИЦ, глицерин и ДБДЛО, имеют следующие показатели (табл. 2).

Как видно из табл. 2, покрытия, полученные на основе МНПС, имеют повышенные физико-механические показатели. По сравнению с эталоном (образец 6) условная прочность возросла с 12 до 27 кгс/см $^2$ , относительное удлинение — с 70 до 182 %. Найдено оптимальное соотношение «каучук: ЖПП» (1:0,6), при котором получены наилучшие результаты [13].

При дальнейших исследованиях была проведена сополимеризация каучука ПДИ-1К со стиролом в среде растворителя — толуола.

Таблица 2 Состав и свойства покрытий

Наименование компонентов		Соста	в, масс. ч	ı., и свой	ства	
и показателей	1	2	3	4	5	6
1. Низкомолекулярный гидро- ксилсодержащий каучук ПДИ- 1К						100
2. МНПС (соотношение каучук : ЖПП)	100 (1:0,1)	100 (1:0,3)	100 (1:0,6)	100 (1:0,6)	100 (1:1)	_
3. Низкомолекулярный спирт — глицерин	5	4	3	2	4	4
4. Полиизоцианат	24	22	19	15	20	20
5. Катализатор уретанообразования — ДБДЛО	0,1	0,01	0,1	0,01	0,01	0,1
6. Твердость по Шору $A$ , у. е.	58	70	72	70	72	54
7. Условная прочность, кгс/см <sup>2</sup>	13	20	25	27	20	12
8. Относительное удлинение, %	75	150	168	180	182	70
9. Эластичность по отскоку, %	40	42	55	53	45	40

При сополимеризации вышеуказанных нефтеполимерных смол существенным недостатком является необходимость отгонки растворителя перед дальнейшим использованием. По этой причине предложена возможность проведения реакции в среде пластификаторов, которые являются необходимым компонентом полимерной композиции на стадии ее промышленного использования. Сополимеризация в среде пластификатора имеет несколько преимуществ, таких как возможность избежать процессов сушки полимеров, отгонки растворителя при проведении полимеризации в нем. Широко применяемыми в резиновой промышленности пластификаторами являются следующие: масло-мягчитель «Нетоксол» [14]; хлорпарафин марки ХП-470 [15]; дибутилфталат [16].

Также следует отметить, что отсутствие в составе композиций пластификатора не позволяет вводить наполнители, которые увеличивают физикомеханические показатели и наделяют композиции дополнительными свойствами, такими как гидрофобные, гидроизоляционные и/или противопожарные.

Сополимеры каучуков со стиролом получали с использованием пластификаторов уретановых композиций, используя их как среды для сополимеризации. Так, в результате модификации каучуков стиролом они сохраняют гидроксильные группы, и на их основе были получены композиции для покрытий при помощи отверждения полиизоцианатом в присутствии глицерина и ДБДЛО. Результаты испытания образцов покрытий и их составы приведены в табл. 3.

Состав и свойства композиций

Наименование компонентов и показателей						Соста	ів, масс	Состав, масс. ч., и свойства	зойства					
	1	2	3	4	5	9	7	8	6	10	11	12	13	14
Гидроксилсодержащий низкомолекулярный каучук ПДИ-1К														100
Продукт сополимеризации каучука со стиролом состава:	200	210	230	230	230	270	210	210	230	230	230	210	170	
1) ПДИ-1К	100	100	100	100	100	100	100						100	
2) Krasol LBH 3000								100	100	100			_	
3) Nisso G 3000		-				-					100	100	-	
4) стирол	20	30	50	50	50	20	30	30	95	50	50	30	30	ı
5) масло «Нетоксол»	80	80	80				80	80	08		80	08	40	80
6) дибутилфталат				80										
7) хлорпарафин марки ХП-470					80	120				80				
Полиизоцианат	21	21	21	21	21	21	44	21	21	21	21	21	17	21
Глицерин	3	3	3	3	3	3	9	3	3	3	3	3	2	3
Катализатор уретанообразования — ДБДЛО	0,01	0,01	0,1	0,01	0,01	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	0,01
Условная прочность при разрыве, кгс/см <sup>2</sup>	3,0	3,5	2,5	2,5	7,0	3,0	2,5	3,5	3,5	4,0	20,0	4,0	7,0	1,5
Относительное удлинение, %	80	110	80	100	110	110	120	100	100	110	100	110	120	100
Твердость по Шору А, усл. ед.	41	43	30	36	44	30	46	43	40	42	09	44	45	28

Примечание: в качестве инициатора в примерах 4...6, 9...11 дитретбутилпероксид, в остальных примерах — дилаурилпероксид.

Как видно из табл. 3, применение сополимера каучука со стиролом позволяет получать композиции с высокими физико-механическими характеристиками. По данным табл. 3 можно проследить закономерности изменения механических показателей образцов покрытий по изменениям количества отдельных компонентов. Так, сравнивая первые три образца, можно видеть, что оптимальным содержанием стирола для системы «Каучук ПДИ-1К и пластификатор "Нетоксол"» является 30 масс. ч. Образец 2 имеет условную прочность 3,5 кгс/см<sup>2</sup> при 80 масс. ч. «Нетоксола», а при уменьшении содержания пластификатора до 40 масс. ч. (образец 13) условная прочность возрастает вдвое (7 кгс/см<sup>2</sup>). При сравнении показателей образцов 3, 4, 5 видно влияние природы пластификатора на свойства получаемого покрытия. Так, при использовании хлорпарафина марки ХП-470 условная прочность увеличивается с 2,5 до 7 кгс/см $^2$ , твердость по Шору A возрастает с 30 до 44 усл. ед. и сохраняется удовлетворительное значение относительного удлинения (110 %). Однако увеличение количества ХП-470 до 120 масс. ч. приводит к резкому падению условной прочности покрытия с 7,0 до 3,0 кгс/см<sup>2</sup>. При рассмотрении показателей образцов 2 и 7 видно, что увеличение количества полиизоцаната и глицерина снижает условную прочность на 1 кгс/см<sup>2</sup> [17].

Кроме каучука марки ПДИ-1К, были испытаны широко применяемые бутадиеновые каучуки марок Krasol LBH 3000 и Nisso PB G 3000.

Сравнивая показатели образцов, полученных на основе сополимеров с использованием каучука Krasol LBH 3000 (образцы 8, 9, 10), заметно, что количество вводимого стирола и природа пластификатора практически не оказывают влияния на физико-механические показатели покрытий.

При использовании сополимеров на основе каучука Nisso PB G 3000 получены покрытия с высокими показателями, такими как условная прочность до 20 кгс/см<sup>2</sup>, твердость по Шору A до 60 усл. ед., при сохранении хорошего показателя относительного удлинения (100 %). Это, по-видимому, связано с высокой функциональностью данной марки каучука (содержание двойных связей в цепочке минимум 90 %) [18].

Таким образом, приведенные результаты испытаний образцов покрытий доказывают целесообразность применения сополимеров стирола с низкомолекулярными бутадиеновыми каучуками в качестве основы композиций, а также применение нефтеполимерных смол в качестве наполнителя композиций для кровельных и напольных покрытий строительного назначения. Использование вышеперечисленных сополимеров и низкомолекулярных бутадиеновых каучуков снижает себестоимость предлагаемых напольных покрытий и гидроизоляционных материалов.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Резина. Метод определения твердости по Шору А : ГОСТ 263-75. Введ. 1977-01-01. М., 1976. 6 с.
- 2. Способ получения нефтеполименых смол : пат. 2451694 РФ, МПК C08F240/00 / А. И. Рахимов, М. П. Ганицев, Н. А. Рахимова, М. А. Марышева, В. Ф. Желтобрюхов ; заявитель и патентообладатель ВолгГТУ. № 2011123930/04 ; заявл. 10.06.2011 ; опубл. 27.05.2012. 4 с.
- 3. Композиция для покрытий : пат. 2470972 РФ, МПК C09D175/14, C09D109/00 / Н. А. Рахимова, М. А. Марышева, А. И. Рахимов, М. П. Ганицев, В. П. Медведев, В. Ф. Желтобрюхов, А. Ю. Марышев ; заявитель и патентообладатель ВолгГТУ. № 2011123924/05 ; заявл. 10.06.2011 ; опубл. 27.12.2012. 5 с.

- 4. Hydrocarbon resins, processes for their manufacture and adhesive compositions containing such resins: pat. 5571867 USA, Current International Class C08L009/00 / Q. Luvinh, A. V. Macedo, R. J. F. Rydzkowski; Assignee Exxon Chemical Patents Inc. № 10712339; filed 05.11.1996. 14 p.
- 5. Bratychak M. M., Grypyshyr O., Bazylyak L. Epoxidized petroleumpolymeric resins synthesis and polyblends compounding // Plasty a kauc. 1999. V. 36, № 1. P. 6—9.
- 6. Pokhmurska M. V., Zin I. M., Humenetski C. I. Protective properties of epoxide coatings, modified by aromatic petroleum resins // Bulletin of Electrochemistry. 2003. № 10 (4-5). P. 158—160.
- 7. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении : ГОСТ 270-75. М., 1986. 11 с.
  - 8. Толуол нефтяной. Технические условия: ГОСТ 14710-78. М., 1979. 4 с.
- 9. Способ получения модифицированных нефтеполименых смол: пат. 2454434 РФ, МПК С08F240/00 / А. И. Рахимов, М. П. Ганицев, Н. А. Рахимова, М. А. Марышева, В. Ф. Желтобрюхов; заявитель и патентообладатель ВолгГТУ. № 2011123938/04; заявл. 10.06.2011; опубл. 27.06.2012. 5 с.
- 10. Каучук низкомолекулярный ПДИ-1К. Технические условия: ТУ 38-103342-88. М., 1988. 15 с.
- 11.  $\it Paxumos~A.~M.~$  Химия и технология органических перекисных соединений. М. : Химия. 1979. 392 с.
- 12. Сополимеризация стирола с дициклопентадиеном и гидроксилсодержащим низкомолекулярным бутадиеновым каучуком. Синтез и свойства / А. И. Рахимов, М. П. Ганицев, Н. А. Рахимова, В. П. Медведев, М. А. Марышева // Известия ВолгГТУ. Сер.: Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов. 2011. № 2(75). С. 95—97.
- 13. Композиция для покрытий: пат. 2470970 РФ, МПК С09D175/14, С09D109/00 / Н. А. Рахимова, М. А. Марышева, А. И. Рахимов, М. П. Ганицев, В. П. Медведев, В. Ф. Желтобрюхов, А. Ю. Марышев; заявитель и патентообладатель ВолгГТУ. № 2011128997/05; заявл. 12.07.2011; опубл. 27.12.2012. 4 с.
- 14. Масло-мягчитель для резиновой промышленности Нетоксол. Технические условия: ТУ 38.101999-84. М., 1985. 4 с.
- 15. Парафин хлорированный ХП 470. Технические условия : ТУ 2493-339-05763458-2003. М., 2003. 10 с.
  - 16. Пластификаторы. Технические условия: ГОСТ 8728-88. М., 1989. 12 с.
- 17. Композиции на основе арилированного гидроксилсодержащего бутадиенизопренового олигомера ПДИ-1К / А. И. Рахимов, М. П. Ганицев, В. П. Медведев, М. А. Марышева, О. А. Родионова, М. Ю. Белянская // Известия ВолгГТУ. Сер.: Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов. 2012. № 5(92). С. 114—117.
- 18. Композиция для покрытий : пат. 2494130 РФ, МПК С09D109/00, С09D175/14 / А. И. Рахимов, М. П. Ганицев, В. П. Медведев, О. А. Родионова, М. Ю. Белянская ; заявитель и патентообладатель ВолгГТУ. № 2012124185/05 ; заявл. 09.06.2012 ; опубл. 27.09.2013. 4 с.
- 1. Rezina. Metod opredeleniya tverdosti po Shoru A : GOST 263-75. Vved. 1977-01-01. M., 1976. 6 s.
- 2. Sposob polucheniya neftepolimenykh smol: pat. 2451694 RF, MPK S08F240/00 / A. I. Rakhimov, M. P. Ganitsev, N. A. Rakhimova, M. A. Marysheva, V. F. Zheltobryukhov; zayavitel' i patentoobladatel' VolgGTU. № 2011123930/04; zayavl. 10.06.2011; opubl. 27.05.2012. 4 s.
- 3. Kompozitsiya dlya pokrytiy: pat. 2470972 RF, MPK S09D175/14, C09D109/00 / N. A. Rakhimova, M. A. Marysheva, A. I. Rakhimov, M. P. Ganitsev, V. P. Medvedev, V. F. Zheltobryukhov, A. Yu. Maryshev; zayavitel' i patentoobladatel' VolgGTU. № 2011123924/05; zayavl. 10.06.2011; opubl. 27.12.2012. 5 s.
- 4. Hydrocarbon resins, processes for their manufacture and adhesive compositions containing such resins: pat. 5571867 USA, Current International Class S08L009/00 / Q. Luvinh, A. V. Macedo, R. J. F. Rydzkowski; Assignee Exxon Chemical Patents Inc. № 10712339; filed 05.11.1996. 14 p.
- 5. Bratychak M. M., Grypyshyr O., Bazylyak L. Epoxidized petroleumpolymeric resins synthesis and polyblends compounding // Plasty a kauc. 1999. V. 36, № 1. R. 6—9.
- 6. Pokhmurska M. V., Zin I. M., Humenetski C. I. Protective properties of epoxide coatings, modified by aromatic petroleum resins // Bulletin of Electrochemistry. 2003. № 10 (4-5). P. 158—160

- 7. Metod opredeleniya uprugoprochnostnykh svoystv pri rastyazhenii : GOST 270-75. M., 1986. 11 s.
  - 8. Toluol neftyanoy. Tekhnicheskie usloviya: GOST 14710-78. M., 1979. 4 s.
- 9. Sposob polucheniya modifitsirovannykh neftepolimenykh smol: pat. 2454434 RF, MPK S08F240/00 / A. I. Rakhimov, M. P. Ganitsev, N. A. Rakhimova, M. A. Marysheva, V. F. Zheltobryukhov; zayavitel' i patentoobladatel' VolgGTU. № 2011123938/04; zayavl. 10.06.2011; opubl. 27.06.2012. 5 s.
- $10.\ Kauchuk nizkomolekulyarnyy PDI-1K. Tekhnicheskie usloviya : TU 38-103342-88. M., 1988. 15 s.$
- 11. Rakhimov A. I. Khimiya i tekhnologiya organicheskikh perekisnykh soedineniy. M.: Khimiya. 1979. 392 s.
- 12. Sopolimerizatsiya stirola s ditsiklopentadienom i gidroksilsoderzhashchim nizkomolekulyarnym butadienovym kauchukom. Sintez i svoystva / A. I. Rakhimov, M. P. Ganitsev, N. A. Rakhimova, V. P. Medvedev, M. A. Marysheva // Izvestiya VolgGTU. Ser.: Khimiya i tekhnologiya elementoorganicheskikh monomerov i polimernykh materialov. 2011. № 2(75). S. 95—97.
- 13. Kompozitsiya dlya pokrytiy : pat. 2470970 RF, MPK S09D175/14, C09D109/00 / N. A. Rakhimova, M. A. Marysheva, A. I. Rakhimov, M. P. Ganitsev, V. P. Medvedev, V. F. Zheltobryukhov, A. Yu. Maryshev ; zayavitel' i patentoobladatel' VolgGTU. № 2011128997/05 ; zayavl. 12.07.2011 ; opubl. 27.12.2012. 4 s.
- 14. Maslo-myagchitel' dlya rezinovoy promyshlennosti Netoksol. Tekhnicheskie usloviya: TU 38.101999-84. M., 1985. 4 s.
- 15. Parafin khlorirovannyy KhP 470. Tekhnicheskie usloviya : TU 2493-339-05763458-2003. M., 2003. 10 s.
  - 16. Plastifikatory. Tekhnicheskie usloviya: GOST 8728-88. M., 1989. 12 s.
- 17. Kompozitsii na osnove arilirovannogo gidroksilsoderzhashchego butadien-izoprenovogo oligomera PDI-1K / A. I. Rakhimov, M. P. Ganitsev, V. P. Medvedev, M. A. Marysheva, O. A. Rodionova, M. Yu. Belyanskaya // Izvestiya VolgGTU. Ser.: Khimiya i tekhnologiya elementoorganicheskikh monomerov i polimernykh materialov. 2012. № 5(92). S. 114—117.
- 18. Kompozitsiya dlya pokrytiy : pat. 2494130 RF, MPK C09D109/00, S09D175/14 / A. I. Rakhimov, M. P. Ganitsev, V. P. Medvedev, O. A. Rodionova, M. Yu. Belyanskaya ; zayavitel' i patentoobladatel' VolgGTU. № 2012124185/05 ; zayavl. 09.06.2012 ; opubl. 27.09.2013. 4 s.

© Ганицев М. П., Рахимов А. И., Акчурин Т. К., 2014

Поступила в редакцию в мае 2014 г.

### Ссылка для цитирования:

*Ганицев М. П., Рахимов А. И., Акчурин Т. К.* Разработка составов и технологий эффективных строительных композиций на основе гидроксилсодержащих сополимеров с полиизоцианатом // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 45—53.

УДК 691.002:658.511.2

### М. А. Гончарова, Ф. Н. Корвяков

# ВЫЯВЛЕНИЕ МЕХАНИЗМА УЧАСТИЯ КОНВЕРТЕРНЫХ ШЛАКОВ В СТРУКТУРООБРАЗОВАНИИ ЭФФЕКТИВНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ

Приведены особенности физико-химических свойств конвертерных шлаков, определяющих их гидравлическую активность. Выявлены механизмы участия конвертерных шлаков в структурообразовании композиционных вяжущих веществ.

К л ю ч е в ы е  $\,$  с л о в а: конвертерный шлак, структурообразование, эффективные строительные композиты, механизм участия.

The article presents the features of physical and chemical properties of converter slag, defining their hydraulic activity. The process of participation of converter slag in structuring of composite binding materials is revealed.

 $K\ e\ y \ w\ o\ r\ d\ s$ : converter slag, structuring, effective construction composites, process of participation.

Проблема накопления техногенных продуктов, несмотря на многочисленные усилия по ее решению, до сих пор актуальна. Неиспользуемые отходы оказываются источниками загрязнения экосистемы, что приводит к закономерному ухудшению качества жизни и параметров среды обитания человека. В то же время отходы являются источником постоянно пополняемых материально-сырьевых ресурсов, которые принято называть вторичными материальными ресурсами. Установлено, что использование промышленных отходов позволило бы покрыть до 40 % потребности строительства России в сырьевых ресурсах, на 10...30 % сократить затраты на изготовление строительных материалов.

На отечественных металлургических предприятиях для производства одной тонны стали как целевого продукта в технологический процесс вовлекается примерно 10 тонн природных ресурсов. Несмотря на совершенствование металлургического производства, неизменным остается то, что получению металла как целевого продукта сопутствует образование многочисленных видов отходов, из которых наиболее многотоннажными являются конвертерные шлаки.

Из всех способов получения стали в настоящее время наиболее прогрессивным и производительным считается кислородно-конвертерный, позволяющий получать сталь высокого качества с меньшим количеством шлаков и отходов, а также применять технологии непрерывной разливки стали (удельные капитальные затраты на выплавку тонны стали в конвертерных цехах в 1,5...2 раза ниже, чем в мартеновских, производительность труда в 1,5 раза выше, а эксплуатационные расходы на 28,0...44,5 % ниже).

Кислородно-конвертерный процесс производства стали в промышленном варианте был впервые реализован в 1952 г. и почти полностью вытеснил мартеновский во всех промышленно развитых странах. В настоящее время кон-

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки в рамках базовой части НИР № 496.

вертерное производство России включает 8 цехов с 22 конвертерами. На российских металлургических предприятиях около 60 % всей выплавляемой стали производится конвертерным способом (ОАО «НЛМК», ОАО «ММК», ОАО «Северсталь», ОАО «ЗСМК», ОАО «НТМК», ОАО «ЧМК»). Причем за последние десять лет производство кислородно-конвертерной стали увеличилось в 1,7 раза, следовательно, увеличился и выход конвертерных шлаков.

Конвертерный шлак — побочный продукт сталеплавильных процессов, состоящий из оксидов и сульфидов, образующихся при взаимодействии с кислородом примесей, содержащихся в чугуне и металлургическом ломе, шлакообразующих, миксерного и доменного шлака, поступающих с чугуном, а также от футеровки плавильных агрегатов. Удельный выход конвертерных шлаков колеблется от 120 до 260 кг на тонну стали, что в рамках одного металлургического предприятия составляет от двух до семи миллионов тонн в год. При этом уровень использования критически низкий. Объяснением этому служит целый ряд причин, препятствующих утилизации конвертерных шлаков: относительно низкая активность, нестабильность их химических, механических и физических свойств, неустойчивость структуры, большое количество металлических примесей.

В этой связи разработка принципиально нового научного подхода к производству эффективных строительных композитов на основе конвертерных шлаков является крайне актуальной. Только соответствующее качество и высокая эффективность их производства могут обеспечить конкурентоспособность на рынке строительных материалов. Совокупность свойств и характеристик композита формирует интегральный показатель эффективности проектируемого материала, который в общем виде можно представить следующей функциональной зависимостью:

$$\Theta = f(\mathfrak{I}_1, \mathfrak{I}_2, ..., \mathfrak{I}_n),$$

где характеристики  $\mathfrak{I}_1$ ,  $\mathfrak{I}_2$ , ...,  $\mathfrak{I}_n$  являются показателями функциональной эффективности (прочность, долговечность, специальные свойства), экологической безопасности, экономической эффективности производства и др. (рис. 1).



Рис. 1. Критерии эффективности (качества композитов)

Технологические решения, направленные на повышение эффективности строительных композитов на основе конвертерных шлаков, должны способствовать выявлению неизвестных ранее структурных особенностей и фазовых переходов вещества, минеральных разновидностей, обусловливающих потребительские свойства сырья, а также применение новых подходов к конструированию строительного композита. В рамках такой постановки проблемы необходимо использовать методологию системного тестирования и диагностики техногенных отходов как потенциального сырья для производства строительных материалов (рис. 2) [1].



Рис. 2. Методология тестирования и диагностики конвертерных шлаков для производства строительных композитов

Такая методология и соответствующая ей логика подхода позволяют обозначить комплекс целенаправленных действий, в составе которых исследователь может произвести тестирование характеристик техногенного продукта и осуществить его диагностику с точки зрения наиболее эффективного использования в строительном производстве. Этапы составляют методологическую систему (рис. 3), обеспечивающую научно обоснованную постановку и решение задачи строительно-технологической утилизации конвертерных шлаков.

На основе анализа генезиса и способов переработки были выделены группы конвертерных шлаков, физико-механические свойства которых изменялись незначительно. Это позволило построить дерево техногенного продукта, позволяющее рассмотреть все альтернативные направления использования этих материалов в стройиндустрии.

Тонкодисперсные шлаки проявляли достаточную гидравлическую активность, которая усиливалась в результате химической и механохимической активации процессов твердения. В результате были сформированы системы твердения строительных композитов на основе шлаков, вклю-

чающие портландцемент как активатор твердения (до 30 % от массы шлака), микрокремнезем как модифицирующий компонент, а также пластификаторы и ускорители твердения. Шлаковый песок и щебень с успехом могут заменить традиционные заполнители в цементных бетонах с условием контроля устойчивости их структуры. На основе разработанных многокомпонентных вяжущих и рационально подобранного гранулометрического состава песка на основе конвертерных шлаков были получены оптимальные составы мелкозернистого бетона для производства безнапорных труб радиального прессования и тротуарных плит с использованием вибропрессования. В то же время, если использовать шлак без предварительной магнитной сепарации, металлическая составляющая (около 10 %) может играть роль ферромагнитного наполнителя в магнитно-герметизирующих композициях [2].



Рис. 3. Методика системного тестирования и диагностики строительных композитов на основе конвертерных шлаков

Таким образом, разработка и внедрение эффективных строительных композитов на основе конвертерных шлаков позволит добиться существенных экономических выгод, сопряженных со снижением себестоимости готовых изделий, рациональным ресурсопотреблением, значительного экологического эффекта (повышение безопасности среды обитания, снижение экологической нагрузки на регион, повышение экологичности материала на всех стадиях жизненного цикла, уменьшение территорий, отведенных под хранение отходов), а также необходимой функциональной эффективности (за счет выявления и максимального использования механизма структурообразования композитов на основе отходов).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. К проблеме биотехносферной совместимости регионов с развитой металлургической промышленностью (на примере г. Липецка) / Е. М. Чернышов, М. А. Гончарова, А. Д. Корнеев, Н. Д. Потамошнева // Строительство и реконструкция. Известия ОрелГТУ. Сер.: Строительство. Транспорт. 2009. № 5/25(573). С. 68—71.
- 2. Гончарова М. А. Системы твердения и строительные композиты на основе конвертерных шлаков. Воронеж : ВГАСУ, 2012. 138 с.
- 1. K probleme biotekhnosfernoy sovmestimosti regionov s razvitoy metallurgicheskoy promyshlennost'yu (na primere g. Lipetska) / E. M. Chernyshov, M. A. Goncharova, A. D. Korneev, N. D. Potamoshneva // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. Izvestiya OrelGTU. Ser.: Stroitel'stvo. Transport. 2009. № 5/25(573). S. 68—71.
- 2. Goncharova M. A. Sistemy tverdeniya i stroitel'nye kompozity na osnove konverternykh shlakov. Voronezh: VGASU, 2012. 138 s.

© Гончарова М. А., Корвяков Ф. Н., 2014

Поступила в редакцию в феврале 2014 г.

Ссылка для цитирования:

*Гончарова М. А., Корвяков Ф. Н.* Выявление механизма участия конвертерных шлаков в структурообразовании эффективных строительных композитов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 54—58.

УДК 691:699.8

# В. Т. Ерофеев, В. Т. Фомичев, С. В. Хуторской

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ АКТИВАЦИИ ВОДЫ ЗАТВОРЕНИЯ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ИЗВЕСТИ\*

Рассматриваются пути повышения биологической стойкости строительных композитов на основе извести с помощью обработки воды затворения электрическим током и магнитным полем. Исследуется влияние активации воды на физико-механические свойства композитов на основе гашеной и негашеной извести.

К л ю ч е в ы е с л о в а: биостойкость, гашеная и негашеная известь, обрастаемость микроорганизмами, активация воды.

The authors consider the ways to increase the biological stability of construction composites based on lime with the help of mixing water processing with electric current and the magnetic field. The influence of the activation of water on the physical and mechanical properties of composites based on slaked and quicklime is investigated.

 $K\ e\ y\ w\ o\ r\ d\ s:$  biological stability, slaked and quicklime, encrustation of microorganisms, water activation.

В работах [1, 2] показано, что электромагнитная активация растворных и бетонных смесей, а также составляющих их компонентов является одним из действенных технологических приемов, позволяющих целенаправленно регулировать свойства изделий на их основе. При этом активация вяжущих веществ может начинаться с момента их производства и продолжаться в течение всего периода твердения материалов, т. е. последствие активированной обработки наблюдается в композиционных материалах в течение длительного времени их службы благодаря явлениям структурной наследственности и сохранения определенной направленности гидратационного процесса, заданного на первоначальных этапах преобразования вяжущего в пластичной цементной дисперсии.

Анализ научно-технической литературы [3—6] позволил выделить основные факторы, через которые в той или иной степени проявляется воздействие многообразных видов активации. Исторически сложилось так, что наиболее изученным фактором оказался фазовый состав новообразований в затвердевшем известковом материале. Известно, что при затворении извести водой элементарным начальным актом является поверхностная адсорбция частицей извести ионов и аквакомплексов, находящихся в растворе. Адсорбция молекул воды поверхностью минеральных частиц реализуется за счет образования водородных связей и донорно-акцепторных явлений [3, 4]. Следует отметить, что одновременно в начальный период протекают процессы растворения извести и гидратация образующихся ионов. Растворение твердых веществ является результатом наложения двух процессов: разрушения структуры вещества, идущего с поглощением энергии, и гидратации, сопровождающейся ее выделением.

<sup>\*</sup> Печатается при поддержке РФФИ — грант 13-08-97171 «Исследования в области создания новых полимербетонов, каркасных фибробетонов, бетонов различного фракционного состава с биоцидными добавками для организации промышленного производства строительных изделий с повышенной долговечностью, биологической и климатической стойкостью на предприятиях Республики Мордовия».

При этом на начальном этапе контакта жидкости с ионами вяжущего должна выделяться энергия. Вполне очевидно, что присутствие в жидкой фазе известкового теста различных ионов и молекул, поступающих в систему в результате различных воздействий (введения добавок, обработки воды магнитным и другими полями и т. д.), определенным образом влияет не только на структуру воды затворения, но и на процессы адсорбции, растворения и поверхностной гидратации, а в итоге — и на свойства самого известкового композита.

Вода является наиболее важным фактором, определяющим технологические свойства бетонной смеси. В технологии приготовления бетонных смесей достаточно давно предложено применять магнитно-активированную воду [4, 5]. Эффективность магнитной обработки воды возрастает при сочетании ее с другими технологическими приемами. Так, было установлено, что наиболее устойчивые результаты получаются при одновременной обработке воды магнитным полем и электрическим током, раствором пластификатора (сульфитно-спиртовой барды) и магнитной обработке воды с последующей вибрацией бетона [6]. Приведенные данные свидетельствуют о перспективности применения магнитной и электрохимической обработки воды при приготовлении бетона, хотя в отдельных случаях по невыясненным причинам ожидаемый эффект на производстве не достигался.

В данной работе проведены комплексные исследования известковых композитов на основе гашеной и негашеной извести, доказывающие эффективность применения магнитно- и электрохимически активированой воды в лабораторных и производственных условиях за счет использования более современной аппаратуры и оборудования.

Активация воды затворения известковых композитов производилась тремя методами: обработкой электромагнитным полем, электрическим током и одновременным действием электромагнитного поля и электрического тока. Для получения воды, обработанной электромагнитным полем, применялась установка магнитной противонакипной обработки воды УПОВС-1 «Максмир». Электроактивированную воду получали с помощью аппарата электроактивации воды АЭ-1,0/6 «Максмир». В качестве исследуемых физикомеханических показателей известковых композитов были их плотность, прочность и твердость в зависимости от применяемого режима активации.

Составы известковых композитов, получаемых на основе активированной воды затворения, готовились из композиции, включающей 100 мас. ч. вяжущего и 300 мас. ч. наполнителя в виде кварцевого песка, и затворялись активированной водой. Активация воды проводилась по различным режимам: Э+М (1-1) — активированная вода по режиму с плотностью тока  $j_{\text{max}} = 5,65 \text{ A/m}^2$  в камере электрохимической активации и напряженностью электромагнитного поля  $H_{\text{max}} = 24 \text{ кA/m}$  в рабочем зазоре камеры электромагнитной активации; Э+М (3-3) —  $j_{\text{max}} = 22,58 \text{ A/m}^2$  и  $H_{\text{max}} = 75 \text{ кA/m}$ ; Э+М (6-6) —  $j_{\text{max}} = 43,55 \text{ A/m}^2$  и  $H_{\text{max}} = 135 \text{ кA/m}$ .

Буквенное обозначение режимов Э+М означает, что природная вода была подвержена совместной последовательной активации электрическим током (электрохимическая активация) и электромагнитным полем в рабочих зазорах аппарата. Цифровое обозначение соответствует выбранному режиму работы аппарата, которое характеризует силу тока (позицию переключателя) в цепи электролизера и обмотке намагничивающих катушек. Электрический ток, подаваемый на электроды и катушки электромагнита, принимался посто-

янным. Принятые режимы активации были следующие: 0 — неактивированная вода; 1-1; 1-3; 1-6; 3-1; 3-3; 3-6; 6-1; 6-3; 6-6. Результаты исследования прочности образцов, оцениваемой с помощью ультразвуковых испытаний, приведены на рис. 1.

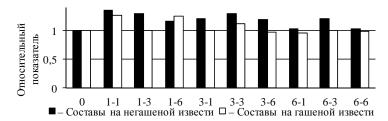


Рис. 1. Относительное изменение скорости распространения ультразвука в зависимости от режима активации воды

Результаты изменения скорости прохождения ультразвука через композиты на основе как негашеной, так и гашеной извести свидетельствуют, что процессы структурообразования известковых композитов идут с некоторыми изменениями в сравнении с затворенными на воде без активации. Из приведенного графика видно, что скорость распространения ультразвука в образцах, полученных с применением активированной воды затворения, выше по сравнению с образцами, приготовленными на воде без активации, что свидетельствует о повышении плотности известковых композитов, затворенных активированной водой. Причем наибольший эффект достигается в случае использования негашеной извести.

Результаты исследования прочности и твердости известковых композитов на активированной воде затворения приведены на рис. 2.

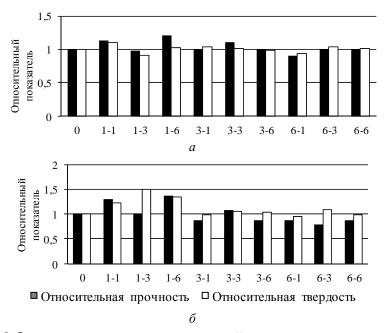


Рис. 2. Зависимость изменения относительной прочности и твердости известковых композитов на негашеной (a) и гашеной  $(\delta)$  извести от режима активации воды

Из полученных данных следует, что известковые композиты на активированной воде затворения, обработанной совместным воздействием электрического тока и магнитного поля при определенных режимах, являются более прочными и имеют большую поверхностную твердость. Это служит дополнительным доказательством того, что активация воды влияет на процессы структурообразования известковых композитов. Наибольшее улучшение показателей для композитов на негашеной извести наблюдается при режимах активации 1-6 и 1-1, а в случае использования гашеной извести — при применении режимов активации 1-1, 1-3 и 1-6. Очевидно, что именно при этих режимах в большей степени активизируются процессы, которые влияют на формирование структуры известкового композита.

В некоторых случаях к известковым композитам предъявляются требования по долговечности, например при эксплуатации в зданиях с биологически активными средами, где строительные материалы, в том числе на известковых вяжущих, подвергаются воздействию микроорганизмов и продуктов их метаболизма.

Для приготовления известковых композитов на основе негашеной извести использовалась активированная вода, которая подвергалась совместному воздействию магнитного и электрического полей. Активация воды проводилась по различным режимам. Исследование биологического сопротивления проводилось в соответствии с ГОСТ 9.049—91 (метод 1 и метод 3). Результаты испытаний приведены в табл.

Влияние активации воды затворения на биостойкость известковых композитов

Pe-	Показ	атели для ко	омпозитов	Показатели для композитов		
жим	на	негашеной и	извести	Н	а гашеной:	извести
акти-	Оценка	а роста	Von m	Оценк	а роста	Von ro
ва-	грибов	, баллы	Хар-ка	грибов	, баллы	Хар-ка по ГОСТу
ции	метод 1	метод 3	110 T OC TY	ю ГОСТу метод 1		110 1 OC 1 y
0	2	4	Грибостоек	3	4	Негрибостоек
1-1	1	4	Грибостоек	1	4	Грибостоек
1-3	0	4	Грибостоек	0	4	Грибостоек
1-6	0	4	Грибостоек	1	4	Грибостоек
3-1	0	4	Грибостоек	0	4	Грибостоек
3-3	0	4	Грибостоек	1	4	Грибостоек
3-6	0	4	Грибостоек	0	4	Грибостоек
6-1	0	4	Грибостоек	1	4	Грибостоек
6-3	0	4	Грибостоек	0	4	Грибостоек
6-6	0	4	Грибостоек	0	4	Грибостоек

Из таблицы видно, что известковые композиты на негашеной и гашеной извести, затворенные водой, обработанной совместным воздействием магнитного и электрического полей, имеют степень роста грибов ниже, чем состав на воде без активации. Все режимы активации, за исключением 1-1, способствуют снижению обрастаемости композитов на негашеной извести до 0 баллов. Активация воды во всех случаях способствовала уменьшению роста грибов у композитов на гашеной извести до 0 и 1 балла при различных режимах по методу 1. Обрастаемость по методу 3 остается неизменной и при всех режимах активации равной 4 баллам.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Ерофеев В. Т., Митина Е. А., Матвиевский А. А.* Композиционные строительные материалы на активированной воде затворения // Строительные материалы. 2007. № 11. С. 2—3.
- 2. Влияние активированной воды затворения на структурообразование цементных паст / В. Т. Ерофеев, В. Т. Фомичев, Д. В. Емельянов, А. И. Родин, А. В. Еремин // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер. : Стр-во и архит. 2013. Вып. 30(49). С. 179—183.
- 3. Сватовская Л. Б., Сычев М. М. Активированное твердение цементов. Л. : Стройиздат, 1983. 160 с.
- 4. Вагнер  $\Gamma$ . P. Физико-химия процессов активации цементных дисперсий. Киев : Наукова думка, 1980. 200 с.
- 5. *Классен В. И.* Омагничивание водных систем. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Химия, 1982. 296 с.
- 6. *Круглицкий Н. Н., Ничипоренко С. П., Черняк Л. П.* Физико-химическая механика дисперсных структур в магнитных полях. Киев : Наукова думка, 1976.
- 1. *Erofeev V. T., Mitina E. A., Matvievskiy A. A.* Kompozitsionnye stroitel'nye materialy na aktivirovannoy vode zatvoreniya // Stroitel'nye materialy. 2007. № 11. S. 2—3.
- 2. Vliyanie aktivirovannoy vody zatvoreniya na strukturoobrazovanie tsementnykh past / V. T. Erofeev, V. T. Fomichev, D. V. Emel'yanov, A. I. Rodin, A. V. Eremin // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2013. Vyp. 30(49). S. 179—183.
- 3. Svatovskaya L. B., Sychev M. M. Aktivirovannoe tverdenie tsementov. L.: Stroyizdat, 1983. 160 s.
- 4. Vagner G. R. Fiziko-khimiya protsessov aktivatsii tsementnykh dispersiy. Kiev: Naukova dumka, 1980. 200 s.
- 5. Klassen V. I. Omagnichivanie vodnykh sistem. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Khimiya, 1982. 296 s.
- 6. Kruglitskiy N. N., Nichiporenko S. P., Chernyak L. P. Fiziko-khimicheskaya mekhanika dispersnykh struktur v magnitnykh polyakh. Kiev: Naukova dumka, 1976.

© Ерофеев В. Т., Фомичев В. Т., Хуторской С. В., 2014

Поступила в редакцию в феврале 2014 г.

# Ссылка для цитирования:

*Ерофеев В. Т., Фомичев В. Т., Хуторской С. В.* Исследование влияния электромагнитной активации воды затворения на свойства композитов на основе извести // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 59—63.

УДК 691.5

# В. И. Логанина, И. С. Пышкина

# ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА СИНТЕЗА НАПОЛНИТЕЛЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ИЗВЕСТКОВЫХ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

Приведены результаты исследований влияния синтезированных наполнителей на основе силикатов кальция на свойства покрытий на основе известковых сухих строительных смесей. Установлена высокая гидравлическая активность синтезированных наполнителей. Выявлено уменьшение количества свободной извести в известковых образцах с добавкой синтезируемых гидросиликатов, повышение прочности.

К л ю ч е в ы е  $\,$  с л о в а: наполнитель, силикаты кальция, сухие строительные смеси, диатомит.

The authors provide the results of studies of the effect of synthesized fillers based on calcium silicates on the properties of covers based on dry lime mixes. High hydraulic activity of synthesized fillers is determined. The authors reveal a decrease in the amount of free lime in the lime samples with additives of synthesized hydro silicates with enhanced durability.

Key words: filler, calcium silicates, dry mixes, diatomite.

Повышение эксплуатационных свойств строительных материалов, в том числе и покрытий на основе сухих строительных смесей (ССС), может быть обеспечено путем введения в их рецептуру нанодисперсных добавок, способных регулировать структурообразование материала [1—4].

Проведенные ранее исследования показали эффективность применения в известковых композитах добавок на основе гидросиликатов кальция (ГСК), полученных синтезом из жидкого стекла в присутствии добавки-осадителя (CaCl<sub>2</sub>) с последующим высушиванием осадка и его измельчением [5, 6].

Методом рентгенофазового анализа установлено, что степень закристаллизованности синтезированных гидросиликатов невысокая, образуются гидросиликаты кальция различной основности. Учитывая, что низкоосновные гидросиликаты кальция обладают более высокой прочностью, в продолжение дальнейших исследований при синтезе наполнителя использовали дополнительно материалы, содержащие аморфный кремнезем, в частности инзенский диатомит с удельной поверхностью  $S_{yg} = 17112 \text{ см}^2/\text{г}$  и средним размером частиц, равным 1,3 мкм.

В работе применялся следующий режим синтеза. К 15%-му раствору  $CaCl_2$  добавлялся диатомит, после перемешивания вводилось натриевое жидкое стекло плотностью 1,279 г/см³ и модулем M=2,8. Полученую смесь перемешивали и отфильтровывали. Осадок высушивали при температуре  $100\,^{\circ}$ С до постоянной массы. При синтезе наполнителя соотношение жидкость/твердая фаза (Ж/Т) варьировали в соотношениях: 1) 1:15; 2) 1:7,5; 3) 1:3,75; 4) 1:3. После высушивания синтезируемый наполнитель измельчался до удельной поверхности  $18\,000\,\mathrm{cm}^2/\mathrm{r}$  со средним размером частиц, равным 1,5 мкм.

Для изучения структуры синтезируемого наполнителя применялся сканирующий растровый электронный микроскоп Shanning Electron Microscope JSM-6390 LV. Съемка проводилась в режиме низкого вакуума при давлении  $P=50~\Pi \mathrm{a}$ .

При оценке структуры синтезируемого наполнителя установлено, что структура диатомита характеризуется микротрещиноватостью, свидетельствующей о его коллоидной природе (рис. 1). Структура наполнителя, синтезируемого без диатомита, представлена образованиями разной формы — пластинчатой и игольчатой, соответствующей гидросиликатам кальция (рис. 2). При изучении структуры наполнителя, синтезируемого в присутствии диатомита, установлено, что диатомит является подложкой, на которой формируются гидросиликаты кальция (рис. 3).

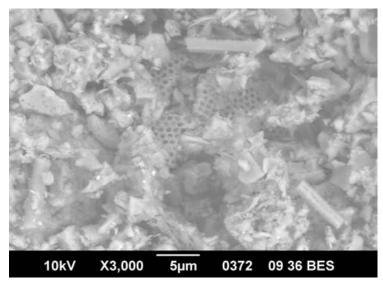


Рис. 1. Изображение структуры диатомита, ×3000

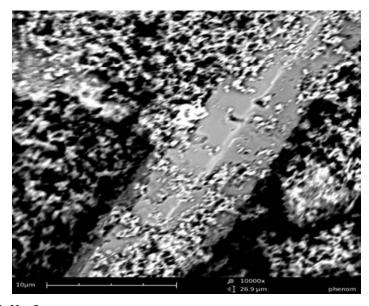


Рис. 2. Изображение структуры синтезированного наполнителя на основе гидросиликатов кальция,  $\times 2500$ 

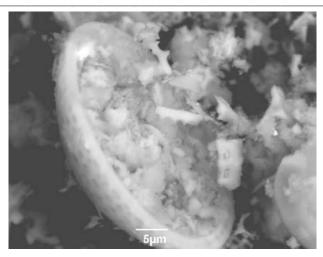


Рис. 3. Изображение структуры наполнителя, синтезированного в присутствии диатомита,  $\times 3000$ 

Наполнитель, синтезируемый в присутствии диатомита, обладает высокой гидравлической активностью, составляющей более 400 мг/г [7] (табл.).

Режим синтеза	Растворимость, %	Активность, мг/г
Добавка без диатомита	68,2	370
$\overline{\mathcal{K}/\mathrm{T}} = 1:15$	73,2	>400
$\overline{\text{W/T}} = 1:3$	79,5	>400
Диатомит	68	370

Активность наполнителя в зависимости от условий синтеза

Эффективность синтезированной добавки оценивалась на примере известковых составов. Готовились смеси с водоизвестковым отношением B/H = 1/1. В качестве вяжущего применялась известь-пушонка. Активность извести составляла 86 %. Количество наполнителя изменялось от 10 до 30 %. Образцы твердели в воздушно-сухих условиях.

Установлено, что при увеличении содержания диатомита в рецептуре синтезированной добавки наблюдается увеличение прочности при сжатии известкового композита. Так, прочность при сжатии образцов, испытанных в возрасте 7 суток твердения в воздушно-сухих условиях при температуре  $18...20~^{\circ}$ С, составляет  $R_{\rm cж}=0.925~{\rm M}\Pi a$  (контрольный состав). Известковые образцы на основе составов, содержащих синтезированные гидросиликаты кальция в количестве 30~% (синтез без диатомита), имеют прочность при сжатии, равную  $R_{\rm cж}=2.575~{\rm M}\Pi a$ , а образцы на основе составов с наполнителем, синтезируемым в присутствии диатомита при соотношении  ${\rm Ж/T}=1:3,$   $R_{\rm cж}=3.3~{\rm M}\Pi a$ .

Отмечается уменьшение количества свободной извести в известковых образцах с добавкой синтезируемых гидросиликатов. Установлено, что количество свободной извести в известковых композитах, твердевших в воздушно-сухих условиях, составляет 44,6 % (контрольный состав), а в известковых образцах на основе составов, содержащих синтезированные гидросиликаты

кальция в количестве 30 % (синтез без диатомита), — 29,8 %, а в образцах на основе составов с наполнителем, синтезируемым в присутствии диатомита при соотношении  $\mathbb{X}/T=1:3, \dots 23,4$  %.

Таким образом, предлагаемый режим синтеза наполнителя в присутствии материалов, содержащих аморфный кремнезем, позволяет получать добавки на основе гидросиликатов кальция, обладающие большей эффективностью взаимодействия с известью, что позволяет повысить эксплуатационные свойства известковых композитов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Свойства синтетических нанотубулярных гидросиликатов / В. В. Строкова, А. И. Везенцев, Д. А. Колесников, М. С. Шиманская // Вестник Белгородского государственного технического университета им. Шухова. 2010. № 4. С. 30—34.
- 2. *Логанина В. И., Давыдова О. А., Симонов Е. Е.* Влияние активации диатомита на свойства известковых композиций // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2011. № 3. С. 20—23.
- 3. *Володченко А. Н., Лесовик В. С.* Силикатные автоклавные материалы с использованием нанодисперсного сырья // Строительные материалы. 2008. № 11. С. 42—44.
- 4. *Логанина В. И., Давыдова О. А., Симонов Е. Е.* Исследование закономерностей влияния золя кремниевой кислоты на структуру и свойства диатомита // Строительные материалы. 2011. № 12. С. 63.
- 5. *Логанина В. И., Макарова Л. В., Сергеева К. А.* Свойства известковых композитов с силикатсодежащими наполнителями // Строительные материалы. 2012. № 3. С. 30—31.
- 6. *Логанина В. И.*, *Макарова Л. В*. Штукатурные составы для реставрационных работ с применением окрашенных наполнителей // Региональная архитектура и строительство. 2009. № 1. С. 38—40.
- 7. Волженский А. В., Буров Ю. С., Колокольников В. С. Минеральные вяжущие вещества. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1979. 476 с.
- 1. Svoystva sinteticheskikh nanotubulyarnykh gidrosilikatov / V. V. Strokova, A. I. Vezentsev, D. A. Kolesnikov, M. S. Shimanskaya // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. Shukhova. 2010. № 4. S. 30—34.
- 2. Loganina V. I., Davydova O. A., Simonov E. E. Vliyanie aktivatsii diatomita na svoystva izvestkovykh kompozitsiy // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo. 2011. № 3. S. 20—23.
- 3. Volodchenko A. N., Lesovik V. S. Silikatnye avtoklavnye materialy s ispol'zovaniem nanodispersnogo syr'ya // Stroitel'nye materialy. 2008. № 11. S. 42—44.
- 4. Loganina V. I., Davydova O. A., Simonov E. E. Issledovanie zakonomernostey vliyaniya zolya kremnievoy kisloty na strukturu i svoystva diatomita // Stroitel'nye materialy. 2011. № 12. S 63
- 5. Loganina V. I., Makarova L. V., Sergeeva K. A. Svoystva izvestkovykh kompozitov s silikatsodezhashchimi napolnitelyami // Stroitel'nye materialy. 2012. № 3. S. 30—31.
- 6. *Loganina V. I., Makarova L. V.* Shtukaturnye sostavy dlya restavratsionnykh rabot s primeneniem okrashennykh napolniteley // Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo. 2009. № 1. S. 38—40.
- 7. Volzhenskiy A. V., Burov Yu. S., Kolokol'nikov V. S. Mineral'nye vyazhushchie veshchestva. 3-e izd., pererab. i dop. M.: Stroyizdat, 1979. 476 s.

© Логанина В. И., Пышкина И. С., 2014

Поступила в редакцию в январе 2014 г.

Ссылка для цитирования:

**Поганина В. И., Пышкина И. С.** Влияние режима синтеза наполнителя на структуру и свойства известковых сухих строительных смесей // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 64—67.

УДК 691.53

# А. П. Пичугин, В. Ф. Хританков, И. В. Белан, Т. К. Акчурин

# РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Представлены результаты исследований в области создания сухих строительных смесей с повышенными эксплуатационными свойствами. Показано, что введение отходов асбестоцементного производства способствует микроармированию растворной смеси, а введение добавки проникающей композиции совместно с редиспергируемым полимерным порошком «Аквапас № 2028», который представляет собой сополимер винилацетата и этилена (ВАЭ) с различными добавками стабилизирующего назначения, хорошо растворим в воде, устойчив к старению в атмосфере, повышает эксплуатационные характеристики строительных композитов. Подтверждением высказанной гипотезы по улучшению свойств строительных растворов из сухих смесей стали проведенные исследования по усадке затвердевшего композита, показавшие положительный эффект совместного влияния этих добавок на изменение деформативных параметров. А это, в свою очередь, способствует повышению прочности и долговечности строительного материала. Методом дифференциально-термического анализа (ДТА) были изучены твердые фазы затвердевшего цементного раствора, полученного из сухих смесей рекомендованных составов. Основной целью данных исследований явилось выявление влияния вводимых добавок — отходов асбестоцемента, проникающей композиции дегидрола и ВАЭ на термостабильность и изменение существующих для обычного цементного камня экзотермических и эндотермических эффектов. Показано, что наряду с увеличением термостабильности повышаются эксплуатационные характеристики затвердевших строительных растворов.

Ключевые слова: отходы, асбестоцемент, сухие строительные смеси, композит.

The results of researches in the field of creation of dry construction mixes with advanced performance characteristics are presented. It is shown that the introduction of wastes of asbestos-cement production promotes micro-reinforcing of mortar mix, and the introduction of an a penetrating composition additive together with redispersible polymeric powder "Akvapas #2028", which is a vinylacetic ester and ethylene (VAE) copolymer with various additives of stabilizing function, dissolves well in water, is resistant to aging in the atmosphere, increases performance characteristics of construction composites. The carried out researches on shrinkage of the hardened composite, which show a positive effect of joint influence of these additives on the change of nonrigid parameters, prove the stated above hypothesis on the improvement of properties of construction solutions from dry mixes. And this, in its turn, promotes the increase of strength and durability of construction material. Solid phases of hardened cement mortar received from dry mixes of recommended structures were studied by the method of differential and thermal analysis (DTA). The main aim of these researches was the determination of influence of introduced additives — asbestos-cement wastes, penetrating composition of degidrol and VAE — on thermal stability and the change of exothermic and endothermic effects existing for usual cement stone. It is shown that along with the increase in thermal stability performance characteristics of the hardened construction solutions increase too.

Key words: asbestos-cement, wastes, dry construction mixes, composite.

Строительные материалы подвергаются различным воздействиям, нагрузкам от изменения температуры среды, атмосферы или других факторов. В результате материалы всегда испытывают внутреннее напряжение сжатия, растяжения, изгиба, среза. От различных напряжений материал в конструкциях по-разному деформируется, т. е. испытывает линейные и объемные изменения, вследствие чего появляются трещины, отколы и др. При многократной переменной нагрузке под влиянием так называемой усталости материала он может разрушиться при напряжениях значительно меньших тех, которые соответствуют предельным для данного материала при однозначных стати-

стических нагрузках. Часто под воздействием атмосферных факторов изменяются первоначальные свойства материала, со временем происходит его старение, сопровождаемое понижением прочности.

Учитывая широкий спектр воздействующих факторов на строительные конструкции и части зданий, расположенных в сибирской климатической зоне, необходимо разработать составы строительных растворов, отличающихся повышенной трещиностойкостью, достаточной адгезионной способностью к основанию для штукатурных составов и к строительным изделиям для кладочных растворов, а также пониженным коэффициентом теплопроводности для исключения мостиков холода в каменной кладке.

По общепринятым методикам были выполнены предварительные расчеты составов сухой строительной смеси с различными добавками из расчета на 1 м<sup>3</sup> с использованием следующих структурных показателей материалов: фракционности, насыпной плотности и пустотности. Как следует из табл., введение небольшого количества отходов асбестоцемента почти не влияет на показатели прочности материала на сжатие, в то же время существенно (почти в три раза) увеличивает предел прочности при изгибе [1—3].

Состав и свойства затвердевших строительных растворов из сухих смесей

Расход составляющих, $\kappa \Gamma / M^3$		Прочност прі	· /	Адгезия,	Плотность, $\kappa \Gamma/M^3$	Коэффициент теплопроводно-	
Цемент	Песок	ОАЦП	сжатии	изгибе	МПа	KI/M	сти, Вт/м · °С
300	900	_	10,012,0	1,21,4	1,41,8	13501470	0,920,97
300	800	50	11,011,4	1,61,9	1,11,6	12201280	0,730,78
300	700	100	12,416,2	2,83,7	0,91,5	11801230	0,450,51
300	600	150	8,68,9	2,12,5	0,70,9	10701130	0,350,41
300	500	200	6,37,1	1,72,3	0,50,8	10301090	0,290,37
300	400	250	4,24,6	1,51,8	0,40,7	900970	0,280,33

При введении отходов АЦП более 15 % отмечается не только снижение прочностных показателей, но и существенное уменьшение адгезии. Низкая адгезионная способность у этих композиций объясняется не только химическим составом и наличием различных малоактивных включений в самих композициях, но и развитой удельной поверхностью волокон асбеста, представляющего собой мельчайшие трубчатые структуры. В то же время, вводя отходы АЦП (более 10 %), можно значительно уменьшить коэффициент теплопроводности, что очень важно при использовании сухих строительных смесей для устройства стен зданий из газобетонных и пенобетонных блоков. Таким образом, для повышения адгезионной способности и эксплуатационной надежности строительных растворов из сухих смесей при сохранении высоких прочностных показателей и низкого значения коэффициента теплопроводности в их состав необходимо вводить дополнительно полимерные и проникающие добавки [3—5].

Дальнейшие исследования были направлены на изучение влияния рецептурных факторов на трещиностойкость строительных растворов из сухих смесей, т. к. одним из негативных свойств конгломератных материалов, в т. ч. и строительных растворов, является их усадка во времени, которая вызвана уменьшением объема цементного камня в растворной части смеси при твер-

дении. Данные деформации обусловлены испарением воды из микрокапилляров и последующим обжатием структуры цементного камня капиллярными силами. В простых стандартных строительных растворах величина усадки может составлять 0,5...1,2 мм/м, что приводит к образованию усадочных трещин, которые отрицательно сказываются на эксплуатационных свойствах, адгезионных характеристиках и других параметрах затвердевших строительных растворов, используемых в зданиях. Кроме того, усадка отрицательно влияет на долговечность соединяемых элементов или защитных составов вследствие возможности насыщения трещин водой и различными растворами, способствующими нарушению целостности и возникновению дополнительных касательных напряжений [6, 7].

На величину усадочных деформаций влияет целый спектр различных факторов, некоторыми из которых является количество цемента и степень крупности мелкого заполнителя. Так, при повышенном расходе минерального вяжущего величина усадки может составлять более одного миллиметра на метр, а при снижении процентного содержания цемента в растворной массе отмечается уменьшение усадки. Кроме того, мелкий минеральный заполнитель по возможности должен представлять достаточно четко определенный гранулометрический состав, обеспечивающий плотную упаковку минеральных составляющих без излишних пор и пустот. С этой целью рекомендуются составы на основе песков средней крупности с модулем крупности от 1,2 до 1,8.

На следующем этапе создания сухих строительных смесей было проведено изучение влияния различных видов мелкого заполнителя на величину усадочных деформаций (рис. 1).

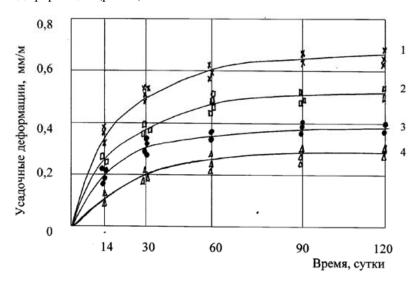


Рис. 1. Влияние вида заполнителя на усадочные деформации мелкозернистого бетона: I — бетон на керамзитовом песке; 2 — бетон на шлаковом песке; 3 — бетон на кварцевом песке; 4 — то же с добавкой отходов АЦП

Как следует из приведенных графиков, строительный раствор на керамзитовом песке (кривая I) имеет значительно большие показатели усадки по сравнению с составами на шлаковом и кварцевом песках (кривые 2 и 3). Существенное снижение усадочных деформаций — почти в два раза — может быть

достигнуто при использовании дисперсного микроармирования, например за счет введения отходов асбестоцементного производства (кривая 4) или другого волокнистого материала [7, 8].

С этих позиций необходимо было уточнить рациональный расход отходов асбестоцементного производства с целью обеспечения минимальной усадки в течение длительного срока хранения и эксплуатации. На рис. 2 представлены кривые зависимости усадки мелкозернистых бетонов на кварцевом песке от содержания отходов асбестоцементного производства. Как следует из приведенных графиков, добавка ОАЦП до 5 % мало влияет на величину усадочных деформаций. При 10...15 % ОАЦП в составе смеси отмечается существенное снижение усадки строительного раствора (почти в два раза), что дополнительно сопровождается увеличением прочности при изгибе. Дальнейшее насыщение смеси отходами асбестоцемента не приводит к положительному эффекту ввиду агрегатизации и чрезвычайно развитой удельной поверхности асбестового волокна, имеющего трубчатую микроструктуру. Поэтому при 20%-м содержании ОАЦП отмечено некоторое увеличение усадки (кривая 5) по сравнению с 15%-м содержанием ОАШП. Кроме того, при данном расходе ОАЦП отмечается возможность получения строительного раствора максимальной плотности для различных расходов цемента, что может свидетельствовать о достижении оптимальной гранулометрии и возможности создания хорошо упакованного плотного конгломерата [7, 9].

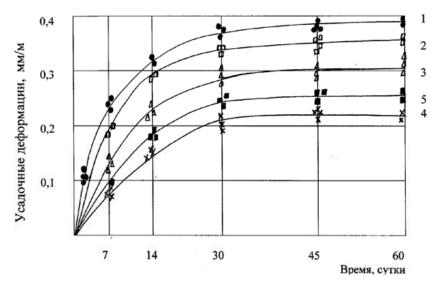


Рис. 2. Влияние добавок отходов АЦП на усадочные деформации строительного раствора на кварцевом песке: 1 — бетон без добавок; 2 — добавка отходов АЦП 5 %; 3 — то же, 10 %; 4 — то же, 15 %; 5 — то же, 20 %

Дополнительным важным фактором обеспечения качественных показателей строительного раствора из сухих смесей является максимально возможное снижение водоцементного отношения при приготовлении растворной массы. Отмечено, что введение отходов асбестоцемента оказывает существенное влияние на увеличение водоцементного отношения, что вызвано высокой внутренней пористостью данного компонента, позволяющего насы-

щаться до ста и более процентов влаги. Поэтому рост этого показателя вполне закономерен и является следствием высокоразвитой пористой структуры асбестового волокна при различных расходах цементного вяжущего.

Снижению водоцементного отношения может способствовать введение пластифицирующих, гидрофобизирующих и полимерных добавок, позволяющих получать пластичные смеси при минимальных расходах воды. Кроме того, введение таких добавок способствует получению плотных малопористых структур, обеспечивающих заданные технологические и эксплуатационные свойства. Нами был использован редиспергируемый полимерный порошок сополимер винилацетата с этиленом (ВАЭ) марки «Аквапас № 2028». На рис. 3 представлены кривые влияния расхода отходов асбестоцемента на водоцементное отношение строительного раствора при введении добавок дегидрола и ВАЭ, показавших положительное влияние на технологическое обеспечение строительных растворных смесей.

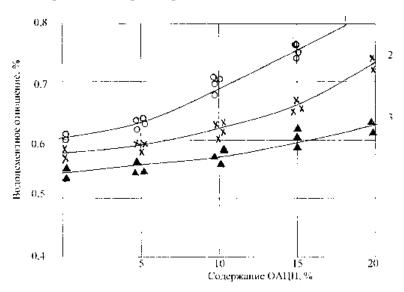


Рис. 3. Влияние расхода отходов асбестоцемента на водоцементное отношение раствора: 1 — без добавок; 2 — с добавкой дегидрола (3 %); 3 — то же + ВАЭ

Отмечено, что совместное введение этих компонентов в сухие строительные смеси способствует снижению водоцементного отношения на 25...45 %, что должно положительно сказаться на пористости цементного камня и его плотности после затвердевания.

Дополнительным эффектом от введения двухкомпонентной добавки в состав сухой строительной смеси является то, что после затвердевания строительного раствора проявляется пластифицирующий эффект, выражающийся в снижении величины усадки более чем в два раза по сравнению с составами без добавок.

На рис. 4 представлены кривые влияния времени твердения строительного раствора на относительную величину усадки. Отмечено, что введение дегидрола и ВАЭ обеспечивает стабилизацию этого процесса после четырехнедельного твердения. В то же время составы без добавок продолжают длительное время изменять свои линейные и объемные размеры [8].

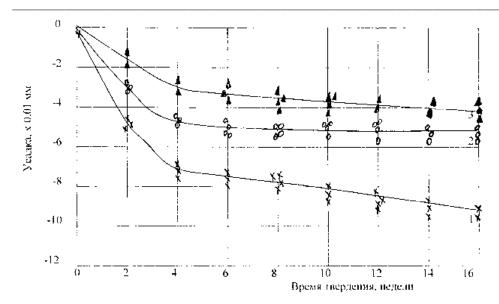


Рис. 4. Влияние времени твердения строительного раствора с содержанием 10 % ОАЦП на величину относительной усадки: I — без добавки; 2 — с добавкой дегидрола; 3 — то же + ВАЭ

Свойства затвердевших строительных растворов на основе минеральных вяжущих с добавками направленного действия во многом обусловливаются видом вяжущего и физико-химическими процессами их твердения. Общеизвестны представления о том, что процесс твердения строительных растворов и затвердевшего вяжущего имеет общие стадии: растворение, коллоидация, кристаллизация и т. д. Идентичность процессов твердения в присутствии воды заключается в закономерностях структурообразования твердеющего вещества и формирования его пористости. Суммарная пористость цементных материалов существенно ниже пористости силикатных и гипсовых бетонов, что объясняет их повышенную устойчивость к воздействующим эксплуатационным факторам и выражается повышением термостабильности [7].

Методом дифференциально-термического анализа (ДТА) были изучены твердые фазы затвердевшего цементного раствора, полученного из сухих смесей рекомендованных составов. Основной целью данных исследований явилось выявление влияния вводимых добавок — отходов асбестоцемента, проникающей композиции дегидрола и ВАЭ — на термостабильность и изменение существующих для обычного цементного камня экзотермических и эндотермических эффектов (рис. 5) [10].

На рис. 5 представлены кривые дифференциального термического анализа исходного сырья для сухих строительных смесей, а также бинарных и тройных компонентов затвердевшего цементного камня вокруг песчаного заполнителя. Изучение полученных термограмм показывает некоторое совпадение и общую картину кривых как для простого цементного камня, так и камня с различными добавками. Так, общими являются эндотермические пики в диапазоне температур 70...150 и 800...840 °C, а также экзотермические эффекты в диапазоне температур 360...495 и 700...770 °C.

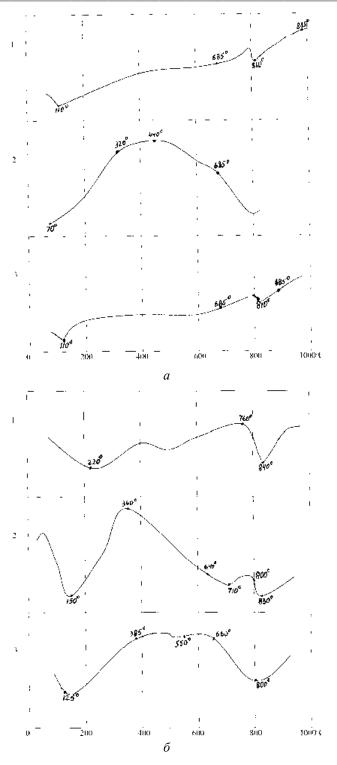


Рис. 5 (начало). ДТА компонентов сухих строительных смесей: a: l — цементный камень; 2 — песок; 3 — минеральный заполнитель + цементный камень;  $\delta$ : l — отходы АЦП; 2 — отходы АЦП + цементный камень; 3 — шлаковый песок + цементный камень

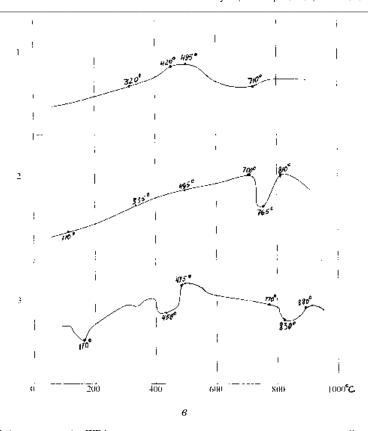


Рис. 5 (окончание). ДТА компонентов сухих строительных смесей:  $\epsilon$ : l — дегидрол; 2 — минеральный заполнитель (песок) + цементный камень + дегидрол; 3 — то же + отходы АЦП

В результате выполненных исследований отмечены процессы гидратации цемента и возможные формы взаимодействия цемента с кварцевым песком и отходами АЦП. По нашему мнению, эндотермические пики при  $685...710\,^{\circ}$ С (рис. 5, a) могут указывать на присутствие значительного количества гелевидных новообразований или гидросиликата кальция. В то же время последний довод не подкрепляется данными по экзотермическому эффекту при  $830\,^{\circ}$ С, являющемуся общепринятой характеристикой данного минерала на кривых ДТА. Показанные на рис. 5, a экзотермические пики в районе  $475...495\,^{\circ}$ С в полной мере свидетельствуют о наличии гидросиликата кальция.

Показано, что введение отхода асбестоцемента способствует повышению термостабильности всей системы, что сопровождается переходом второго экзотермического эффекта с 760 °C в зону повышенных температур 800 °C. Этот эффект можно объяснить проявлением взаимодействия между цементным камнем и волокнами асбеста, обладающими высокой химической устойчивостью и термостабильностью. Положительным фактором является введение дегидрола, который в силу своей проникающей способности обеспечивает более полную гидратацию цемента и создание прочной кристаллической структуры, что отмечено при изучении микроструктуры и структурной пористости цементного камня. Однако использование одного дегидрола в составе строительного раствора несколько снижает термостабильность всей системы, что отмечено на рис. 4, в (кривая 2). Об этом также свидетельствует

эндотермический эффект в районе 765 °C, отвечающий за проявление кристаллизации составляющих дегидрола. Введение отходов асбестоцемента стабилизирует свойства затвердевшего строительного раствора, о чем говорит сдвиг экзотермического эффекта с 700 к 770 °C. Кроме того, об упрочнении всей минеральной системы свидетельствует появившийся третий экзотермический эффект в районе 880 °C, ранее отмеченный только для чистого цементного камня.

Таким образом, для создания малоусадочных строительных растворов из сухих смесей в их состав необходимо вводить от 10 до 15 % отходов асбестоцементного производства, а также дополнительно пластифицирующие добавки полимеров или гидрофобизаторов, обеспечивающих минимальную водопотребность. Кроме того, рациональным, на наш взгляд, является введение специальных добавок, способствующих повышению адгезии и плотности получаемых растворных смесей, что позволит дополнительно улучшить их качество и эксплуатационные показатели, и в первую очередь трещиностойкость. Обладая повышенной трещиностойкостью, строительный раствор способен лучше сопротивляться циклическим температурным воздействиям при попеременном увлажнении и высушивании, замораживании и оттаивании, а это в свою очередь, должно обеспечить повышенную стойкость и долговечность строящихся и ремонтируемых объектов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Белан И. В.* Перспективы развития промышленности строительных материалов Новосибирской области // Экология и новые технологии в строительном материаловедении : Международн. сб. научн. тр. Новосибирск : НГАУ-РАЕН, 2010. С. 141—144.
- 2. *Белан И. В.* Тенденции развития промышленности строительных материалов Новосибирска // Строительное материаловедение: состояние, тенденции и перспективы развития : Международный сб. научн. тр. Новосибирск : НГАУ ТГАСУ РАЕН, 2011. С. 186—188.
- 3. *Безбородов В. А., Парикова Е. В., Пичугин А. П.* Сухие строительные смеси и технология их применения. Новосибирск : НГАСУ-НГАУ, 2010. 126 с.
- 4.  $\Pi$ ичугин А.  $\Pi$ .,  $\Gamma$ ородецкий С. А., Бареев В. И. Комплексная защита сельскохозяйственных объектов от коррозионного разрушения // Строительные материалы. 2011. № 3. С. 45—47.
- 5. Субботин O. C.,  $\Pi$ ичугин A.  $\Pi$ ., Белан H. B. Материалы и архитектура малоэтажных зданий, эксплуатирующихся в особых природных условиях. Новосибирск :  $H\Gamma$ AУ PAEH, 2012. 192 с.
- 6. Сухие строительные смеси специального назначения / В. И. Белан, И. В. Белан, Е. Г. Нерадовский, А. П. Пичугин // Ресурсосберегающие технологии и эффективное использование местных ресурсов в строительстве : Международный сб. научн. тр. Новосибирск : НГАУ ТГАСУ РАЕН, 2013. С. 349—358.
- 7. Роль дисперсного армирования в обеспечении качества растворов и мелкозернистых бетонов / И. В. Белан, С. Н. Карпик, А. П. Пичугин, В. Ф. Хританков // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона : Международный сб. научн. тр. Саратов : СГТУ, 2013. С. 80—84.
- 8. Белан И. В., Пичугин А. П., Денисов А. С. Сухие строительные смеси с активными и микроармирующими добавками // Инновационные разработки и новые технологии в строительном материаловедении: Международный сб. научн. тр. Новосибирск: НГАУ ТГАСУ РАЕН, 2014 С. 186—190
- 9. Сухие смеси с микроармирующими добавками в производстве отделочных строительных материалов / В. И. Белан, И. В. Белан, А. П. Пичугин, С. М. Байболов // Ресурсосберегающие технологии и эффективное использование местных ресурсов в строительстве : Международный сб. научн. тр. Новосибирск : НГАУ ТГАСУ РАЕН, 2013. С. 168—171.
- 10. Выровой В. Н., Белан И. В., Пичугин А. П. Методы оценки структурных изменений в композиционных материалах // Инновационные разработки и новые технологии в строительном материаловедении: Международный сб. научн. тр. Новосибирск: НГАУ ТГАСУ РАЕН, 2014. С. 50—56.

- 1. *Belan I. V.* Perspektivy razvitiya promyshlennosti stroitel'nykh materialov Novosibirskoy oblasti // Ekologiya i novye tekhnologii v stroitel'nom materialovedenii : Mezhdunarodn. sb. nauchn. tr. Novosibirsk : NGAU-RAEN, 2010. S. 141—144.
- 2. *Belan I. V.* Tendentsii razvitiya promyshlennosti stroitel'nykh materialov Novosibirska // Stroitel'noe materialovedenie: sostoyanie, tendentsii i perspektivy razvitiya : Mezhdunarodnyy sb. nauchn. tr. Novosibirsk : NGAU TGASU RAEN, 2011. S. 186—188.
- 3. Bezborodov V. A., Parikova E. V., Pichugin A. P. Sukhie stroitel'nye smesi i tekhnologiya ikh primeneniya. Novosibirsk : NGASU-NGAU, 2010. 126 s.
- 4. *Pichugin A. P., Gorodetskiy S. A., Bareev V. I.* Kompleksnaya zashchita sel'skokhozyaystvennykh ob"ektov ot korrozionnogo razrusheniya // Stroitel'nye materialy. 2011. № 3. S. 45—47.
- 5. Subbotin O. S., Pichugin A. P., Belan I. V. Materialy i arkhitektura maloetazhnykh zdaniy, ekspluatiruyushchikhsya v osobykh prirodnykh usloviyakh. Novosibirsk : NGAU RAEN, 2012. 192 s.
- 6. Sukhie stroitel'nye smesi spetsial'nogo naznacheniya / V. I. Belan, I. V. Belan, E. G. Neradovskiy, A. P. Pichugin // Resursosberegayushchie tekhnologii i effektivnoe ispol'zovanie mestnykh resursov v stroitel'stve: Mezhdunarodnyy sb. nauchn. tr. Novosibirsk: NGAU TGASU RAEN, 2013. S. 349—358.
- 7. Rol' dispersnogo armirovaniya v obespechenii kachestva rastvorov i melkozernistykh betonov / I. V. Belan, S. N. Karpik, A. P. Pichugin, V. F. Khritankov // Resursoenergoeffektivnye tekhnologii v stroitel'nom komplekse regiona : Mezhdunarodnyy sb. nauchn. tr. Saratov : SGTU, 2013. S. 80—84.
- 8. Belan I. V., Pichugin A. P., Denisov A. S. Sukhie stroitel'nye smesi s aktivnymi i mikroarmiruyushchimi dobavkami // Innovatsionnye razrabotki i novye tekhnologii v stroitel'nom materialovedenii : Mezhdunarodnyy sb. nauchn. tr. Novosibirsk : NGAU TGASU RAEN, 2014. S. 186—190.
- 9. Sukhie smesi s mikroarmiruyushchimi dobavkami v proizvodstve otdelochnykh stroitel'nykh materialov / V. I. Belan, I. V. Belan, A. P. Pichugin, S. M. Baybolov // Resursosberegayushchie tekhnologii i effektivnoe ispol'zovanie mestnykh resursov v stroitel'stve: Mezhdunarodnyy sb. nauchn. tr. Novosibirsk: NGAU TGASU RAEN, 2013. S. 168—171.
- 10. *Vyrovoy V. N., Belan I. V., Pichugin A. P.* Metody otsenki strukturnykh izmeneniy v kompozitsionnykh materialakh // Innovatsionnye razrabotki i novye tekhnologii v stroitel'nom materialovedenii : Mezhdunarodnyy sb. nauchn. tr. Novosibirsk : NGAU TGASU RAEN, 2014. S. 50—56.

© Пичугин А. П., Хританков В. Ф., Белан И. В., Акчурин Т. К., 2014

Поступила в редакцию в мае 2014 г.

# Ссылка для цитирования:

Разработка составов сухих строительных смесей с повышенными эксплуатационными характеристиками / А. П. Пичугин, В. Ф. Хританков, И. В. Белан, Т. К. Акчурин // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 68—77.

# СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 624.071.34

# Н. Г. Бандурин, С. Ю. Калашников, А. В. Михальчук

# ИССЛЕДОВАНИЕ НДС СЖАТО-ИЗОГНУТОГО СТЕРЖНЯ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА

На основе предложенного ранее метода решения известного дифференциального уравнения кратко описывается алгоритм вычисления перемещений, деформаций и напряжений в сжато-изогнутом стержне с учетом различных несовершенств его геометрии и вида внешних силовых воздействий. Приводятся оригинальные результаты решения трех тестовых примеров.

K л ю ч е в ы е с л о в а: устойчивость стержня, напряжения в сжато-изогнутом стержне, численные методы.

On the basis of the previously suggested method for the solution of the known differential equation, the article describes briefly the algorithm for calculating the displacements, deformations and stresses in compressed-bent rod taking into consideration various imperfections of its geometry and the types of external loads. The original solution results of 3 test examples are given

K e y words: rod stability, stresses in compressed-bent rod, numerical methods.

Деформированное состояние первоначально прямого сжатого силой N стержня в геометрически линейной постановке в общем случае описывается дифференциальным уравнением четвертого порядка [1,2]

$$EJw^{(IV)} + N(x)w'' + F(x) = 0, (1)$$

где E, J — модуль упругости материала и осевой момент инерции поперечного сечения; F(x) — функция координаты x, которая зависит от начальной погиби, внешних распределенных по длине стержня силовых воздействий (поперечной и продольной нагрузок), коэффициента упругой среды и числовых параметров, определяющих изменение по длине стержня модуля упругости материала и геометрических характеристик поперечного сечения (площади и осевого момента). Вполне допустимо и оправданно принимать начальную погибь упругой оси стержня в виде одной полуволны синусоиды

$$w_0 = y_m \sin(\pi x/l). \tag{2}$$

Обычно при исследовании процесса потери устойчивости стержня используют уравнение второго порядка [3—7], но при этом сужается класс решаемых задач, так как невозможно учесть все разнообразие условий закрепления концов стержня. Применение дифференциального уравнения четвертого порядка в общем случае требует использования высокоточного численного

метода для его решения, в результате которого необходимо получить точные значения не только прогибов изогнутой оси, но и производных до третьего порядка. Только при выполнении этих условий имеется возможность исследовать не только деформированное состояние стержня при различных условиях закрепления его концов, но и его напряженное состояние.

Для решения уравнения (1) должно быть представлено четыре краевых условия: два из них в начальном нижнем сечении (при x=0) и два в верхнем сечении (при x=1).

Примем обозначения: l — длина стержня; A — площадь поперечного сечения стержня (здесь и далее расстояния будем представлять в сантиметрах, а силы — в килоньютонах); b — максимальная координата поперечного сечения в плоскости изгиба, см;  $k_{\rm H}$  — коэффициент жесткости угловой упругой связи в нижнем сечении стержня, кH-см;  $k_2$ — коэффициент жесткости угловой упругой связи в верхнем сечении, кH-см;  $M_1$  — внешний сосредоточенный момент в нижнем сечении, кH-см;  $M_2$  — внешний сосредоточенный момент в верхнем сечении, кH-см;  $e_1$  — эксцентриситет приложения сжимающей силы в нижнем сечении, см;  $e_2$  — эксцентриситет приложения сжимающей силы в верхнем сечении, см;  $\sigma_{\scriptscriptstyle T}$  — предел текучести материала стержня, к $H/cm^2$ ;  $\sigma_{max}$  — максимальное сжимающее напряжение в крайних волокнах поперечного сечения стержня;  $N_{\min}$  — минимальное значение силы N, при котором впервые появляются пластические деформации в крайних волокнах поперечного сечения стержня; q — интенсивность поперечной распределенной нагрузки, кН/см; п — интенсивность продольной распределенной нагрузки, кH/cm; p — коэффициент постели упругой среды, к $H/cm^2$ .

Величины, относящиеся к нижнему и верхнему сечениям, здесь и ниже помечаются индексами 1 и 2 соответственно.

На рис. 1 изображен сжатый стержень в деформированном состоянии, причем прогибы  $w_0$  определяют начальную погибь, полные прогибы w отсчитываются от начальной прямолинейной оси стержня. Напряженное состояние стержня определяется функцией  $w-w_0$  и ее производными. Очевидно, что если в расчете напряженно-деформированного состояния стержня учитывается влияние только одного вида несовершенств или одного вида внешних силовых воздействий, то не имеет значения, с каким знаком входит в уравнение та или иная величина. Если же имеет место одновременное воздействие нескольких величин, то в зависимости от принятой системы знаков может возникнуть ситуация, когда суммарный эффект (перемещения, напряжения и т. д.) от разных воздействий будет равен алгебраической сумме чисел. Если, например, на стержень на рис. 1 с указанным направлением погиби



Рис. 1

будет действовать поперечная распределенная нагрузка справа налево, то очевидно, что под действием этой нагрузки и продольной силы наличие погиби будет увеличивать кривизну оси стержня, а поперечная нагрузка — уменьшать. Для получения максимальной суммарной кривизны необходимо изменить направление или начальной погиби, или нагрузки. В данном алго-

ритме направление погиби соответствует рис. 1, а положительные величины других несовершенств и внешних воздействий будут увеличивать прогибы и кривизну, если принять следующие правила для их направлений:

поперечная распределенная нагрузка q действует слева направо;

внешний сосредоточенный момент в нижнем сечении  $M_{\scriptscriptstyle 1}$  — по часовой стрелке;

внешний сосредоточенный момент в верхнем сечении  $M_{_2}$  — против часовой стрелки;

эксцентриситеты приложения сжимающей силы в нижнем и верхнем сечениях  $e_1$ ,  $e_2$  — влево от центра тяжести.

С учетом принятых обозначений уравнение (1) примет вид

$$EJw^{(IV)} + N(x)w'' + y_m(\pi l)^4 \sin(\pi x/l) - q + p(w - y_m \sin(\pi x/l) + n(w' - (x - l)w'') = 0.$$
(2)

Обобщенные краевые условия:

в нижнем сечении (x = 0):

$$w_1 = 0$$
,

$$E_1 J_1 w_1'' - k_1 (w_1' - y_m \pi / l) + (N_1 + nl)(w_1 + e_1) + M_1 = 0;$$

в верхнем сечении (x = l):

$$w_2 = 0, (3)$$

$$E_2 J_2 w_2'' + k_2 (w_2' + y_m \pi / l) + N_2 (w_2 + e_2) + M_2 = 0.$$

В результате решения уравнения (2) для каждого сечения по длине стержня вычисляются и выводятся на печать (или в текстовый файл) следующие величины, определяющие его напряженно-деформированное состояние: прогиб w и его производные w, w', w'', w''', а также максимальный прогиб и максимальное сжимающее напряжение в крайних волокнах поперечного сечения стержня с указанием координаты этого сечения.

Напряжения вычисляются по формуле

$$\sigma = \frac{-\left(N + n\left(n(l-x)\right)\right)}{A \pm Ew''b}.$$
(4)

Отличительной особенностью описываемого алгоритма для определения НДС сжато-изогнутого стержня является возможность вычисления напряжений при любом значении сжимающей силы вплоть до эйлеровой, которые определяются с использованием изменения кривизны его изогнутой оси, то есть второй производной функции прогиба, что, в свою очередь, требует высокой точности численного решения неоднородного дифференциального уравнения четвертого порядка (1), удовлетворяющего краевым условиям достаточно общего вида (3). В данном алгоритме для решения уравнения (2) используется программа «Стержень», разработанная на основе численного

метода 9-го порядка точности [8], что позволило впервые исследовать по единому алгоритму устойчивость стержня как 1-го, так и 2-го рода. Бесперспективность деления процесса потери устойчивости по родам подчеркивается в монографии В. Г. Зубчанинова [2].

# Тестовые примеры

Для представленных ниже тестовых примеров приняты следующие числовые значения физических и геометрических параметров стержня: модуль упругости материала  $E = 2,1 \cdot 10^4 \, \text{кH/cm}^2$ ; предел текучести материала  $\sigma_m = 20 \text{ кH/cm}^2$ ; длина стержня l = 125 см; форма поперечного сечения d = 5 cm; площадь поперечного круг диаметром сечения  $A = \pi d^2 / 4 = 19,535 \text{ cm}^2$ ; осевой момент инерции  $J = \pi d^4 / 64 = 30,6796 \text{ cm}^4$ ; максимальная координата поперечного сечения в плоскости изгиба b = 2.5 cm;критическая сила формуле Эйлера по  $N_{\text{KD}} = \pi^2 E J / l^2 = 406,957 \text{ kH}.$ 

*Пример 1.* Стержень с шарнирно опертыми концами с погибью (рис. 1). Уравнение (1) в этом случае имеет вид

$$EJw^{(IV)} + Nw'' + y_m(\pi/l)^4 \sin(\pi x/l) = 0.$$

Краевые условия:

$$x = 0$$
:  $w_1 = 0$ ,  $w_1'' = 0$ ;

$$x = l$$
:  $w_2 = 0$ ,  $w_2'' = 0$ .

В результате решения уравнения получаем зависимость между сжимающей силой и максимальным прогибом в среднем сечении стержня, а параметром является максимальное значение начальной погиби  $y_m$  в среднем сечении стержня при x = l/2.

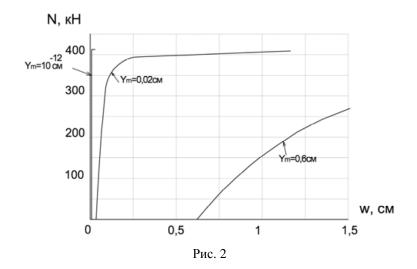
В табл. 1 представлены числовые данные, а на рис. 2 показаны графики этих зависимостей для трех значений параметра  $y_m$ :  $10^{-12}$ , 0,02 и 0,6 см. Для этих параметров значения силы  $N_{\min}$ , соответствующие пределу текучести, будут равны 393, 333 и 154 кН соответственно. Значение  $N_{\min}$  =393 кН при  $y_m = 10^{-12}$  см соответствует простому сжатию стержня без изгиба.

Таблица 1

Сжимающая сила,	Прогиб среднего сечения w, см			
кН	$y_m = 10^{-12}  \text{cm}$	$y_m = 0,02 \text{ cm}$	$y_m = 0,6 \text{ cm}$	
0	$1,0\times10^{-12}$	0,02	0,6	
100	$1,3\times10^{-12}$	0,0265	0,79	
200	$2,0\times10^{-12}$	0,039	1,18	
300	$3.8 \times 10^{-12}$	0,076		
350	$7,1\times10^{-12}$	0,143		
375	$1,3\times10^{-11}$	0,255		

Окончание табл. 1

Сжимающая сила,	Прогиб среднего сечения w, см			
кН	$y_m = 10^{-12}  \text{cm}$	$y_m = 0.02 \text{ cm}$	$y_m = 0,6 \text{ cm}$	
400	$6,0\times10^{-11}$	1,17		
403	$1,0\times10^{-10}$			
405	$2,1\times10^{-10}$			
406	$4,2\times10^{-10}$			
406,5	$8.9 \times 10^{-10}$			
406,9	$7,1\times10^{-9}$			
406,956	$2,9 \times 10^{-7}$			
406,957	$1,1\times10^{-6}$			
406,9571	$1,4\times10^{-6}$			
406,9573	$4.9 \times 10^{-6}$			
406,95735	1,3×10 <sup>-5</sup>			
406,95737	$3,5\times10^{-5}$			
406,957381	$7,2\times10^{-5}$			
406,9573815	6,3×10 <sup>-4</sup>			
406,957382	$-9.3 \times 10^{-4}$			



Видно, что при малом значении параметра  $y_m = 10^{-12}$  и при силе, меньшей  $N_{\rm эйлер}$ , прогибы практически остаются малыми и постоянными, а при достижении силой  $N_{\rm эйлер}$ , наоборот, сила практически остается постоянной, а увеличиваются прогибы. Наблюдается процесс потери устойчивости стержня 1-го рода. При увеличении начальной погиби заметное увеличение прогибов наблюдается уже в начале нагружения, то есть происходит естественный и очевидный процесс деформирования сжато-изогнутого стержня. Таким образом, предлагаемый алгоритм и компьютерная программа «Стержень» позволяют вычислять минимальную сжимающую силу, соответствующую как моменту бифуркации форм потери устойчивости стержня в смысле Эйлера, так и процессу деформирования упругого сжато-изогнутого стержня с одновременным вычислением напряжений в крайних волокнах поперечного сечения. Алгоритм применим без изменения для любых значений гибкости упругого стержня.

**Пример 2.** Стержень с шарнирно опертыми концами, нагруженный поперечной нагрузкой интенсивности q.

Записываем уравнение

$$EJw^{(IV)} + Nw'' - q = 0.$$

Краевые условия:

$$x = 0$$
:  $w_1 = 0$ ,  $w_1'' = 0$ ;

$$x = l$$
:  $w_2 = 0$ ,  $w_2'' = 0$ .

На рис. 3 показаны графики зависимости «прогиб — сила» для некоторых значений нагрузки q.

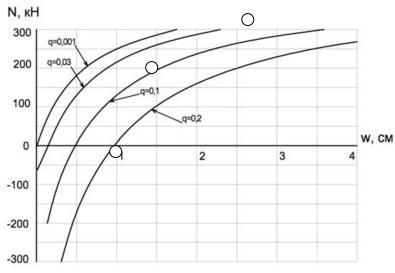


Рис. 3

При малых значениях q этот график идентичен соответствующему графику примера 1. Обобщая, можно заключить, что при малых значениях функции F(x) в результате решения уравнения (1) график зависимости «прогиб — сила» имеет один и тот же вид независимо от конкретной структуры этой функции, а минимальное значение силы Эйлера зависит, в основном, от условий закрепления концов стержня. Кружочками на рисунке показаны моменты появления пластических деформаций в крайних волокнах среднего по высоте сечения стержня. Видно, что с увеличением поперечной нагрузки наименьшее значение продольной силы, при котором появляются пластические деформации  $N_{\min}$ , уменьшается, а при q=0,2 в среднем сечении напряжения превышают предел текучести независимо от значения продольной силы.

**Пример 3.** Стержень с шарнирно опертыми концами и с эксцентриситетом приложения сжимающей силы в верхнем сечении  $e_2$  имеет упругую угловую связь в нижнем сечении с коэффициентом жесткости  $k_1$ . Необходимо при заданных значениях эксцентриситета и коэффициента жесткости упругой

опоры найти наименьшее значение сжимающей силы  $N_{\min}$ , при котором появляются первые пластические деформации в крайних волокнах наиболее нагруженного поперечного сечения, то есть напряжения достигают значения предела текучести  $\sigma_m$ .

Для этого случая записываем уравнение

$$EJw^{(IV)} + N(x)w'' = 0.$$

Краевые условия:

$$w_1 = 0$$
,

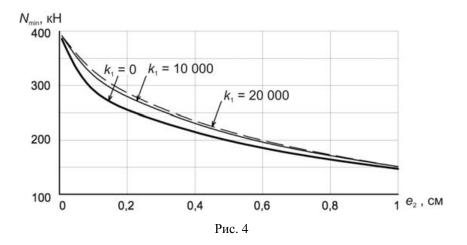
$$EJw_1'' - k_1w_1' = 0$$
;

$$w_2=0,$$

$$EJw_2'' + Ne_2 = 0.$$

Таблица 2

Эксцентриситет $e$ , см	Минимальные значения силы $N_{\min}$ , при которых возникают пластические деформации в крайних волокнах поперечного сечения, кН		
	$k_1 = 0$	$k_1 = 10\ 000$	$k_1 = 20\ 000$
0,001	386	392	392
0,1	292	319	327
0,25	244	266	272
0,5	199	212	216
0,75	169	177	179
1	147	151	151



В табл. 2 представлены значения сжимающей силы  $N_{\min}$ , при которых начинают появляться пластические деформации, а на рис. 4 изображены кривые зависимостей этой силы от величины эксцентриситета для трех значений

коэффициента жесткости упругой опоры. Видно, что с увеличением коэффициента жесткости стержень выдерживает более высокую нагрузку без появления в материале пластических деформаций, что, в свою очередь, объясняется уменьшением гибкости стержня при неизменных физикогеометрических параметрах. В этом случае уменьшается кривизна изогнутой оси и напряжения от изгиба. Из рисунка видно, что при уменьшении эксцентриситета до нуля наименьшее значение сжимающей силы, при которой начинают появляться пластические деформации, соответствует простому сжатию без изгиба независимо от значений коэффициента жесткости упругой опоры k. С увеличением эксцентриситета растут напряжения от изгиба, сжимающая сила  $N_{\min}$  уменьшается.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Вольмир А. С. Устойчивость упругих систем. М.: Физматгиз, 1963. 880 с.
- 2. Зубчанинов В. Г. Механика сплошных деформируемых сред. Тверь : ТГТУ, 2000. 704 с.
- 3. Euler L. Sur la force des colonnes. Berlin: Mem. de l'Acad., 1757. S. 251—282.
- 4. Лейтес С. Д. Устойчивость сжатых стальных стержней. М.: Госстройиздат, 1954. 312 с.
- 5. Крылов А. Н. О формах равновесия вертикально нагруженных элементов. М. : Известия АН СССР, 1931.
  - 6. Бубнов И. Г. Строительная механика корабля. Ч. 1. 1912. 330 с.
  - 7. Динник А. Н. Устойчивость упругих систем. М.: ОНТИ, 1935. 183 с.
- 8. *Бандурин Н. Г.* Новый численный метод порядка n для решения интегродифференциальных уравнений общего вида // Вычислительные технологии. 2002. Т. 7. № 2. С. 3—10.
  - 1. Vol'mir A. S. Ustoychivost' uprugikh sistem. M.: Fizmatgiz, 1963. 880 s.
  - 2. Zubchaninov V. G. Mekhanika sploshnykh deformiruemykh sred. Tver': TGTU, 2000. 704 s.
  - 3. Euler L. Sur la force des colonnes. Berlin: Mem. de l'Acad., 1757. S. 251—282.
  - 4. Leytes S. D. Ustoychivost' szhatykh stal'nykh sterzhney. M.: Gosstroyizdat, 1954. 312 s.
- 5. Krylov A. N. O formakh ravnovesiya vertikal'no nagruzhennykh elementov. M. : Izvestiya AN SSSR, 1931.
  - 6. Bubnov I. G. Stroitel'naya mekhanika korablya. Ch. 1. 1912. 330 s.
  - 7. Dinnik A. N. Ustoychivost' uprugikh sistem. M.: ONTI, 1935. 183 s.
- 8. Bandurin N. G. Novyy chislennyy metod poryadka n dlya resheniya integrodifferentsial'nykh uravneniy obshchego vida // Vychislitel'nye tekhnologii. 2002. T. 7. № 2. S. 3—10.

© Бандурин Н. Г., Калашников С. Ю., Михальчук А. В., 2014

Поступила в редакцию в мае 2014 г.

#### Ссылка для цитирования:

*Бандурин Н. Г., Калашников С. Ю., Михальчук А. В.* Исследование НДС сжато-изогнутого стержня на основе решения дифференциального уравнения четвертого порядка // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 78—85.

УДК 519.62

#### Н. Г. Бандурин, С. Ю. Калашников

# ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД 9-го ПОРЯДКА ТОЧНОСТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОДНОМЕРНЫХ СУЩЕСТВЕННО НЕЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Численный метод 9-го порядка предлагается для автоматического решения систем существенно нелинейных дифференциальных уравнений достаточно произвольной структуры (начальная задача Коши). Приводятся результаты решения трех тестовых примеров.

Ключевые слова: задача Коши, существенно нелинейные уравнения, численные методы.

The authors present the numerical method of the 9<sup>th</sup> order for the automatic solution of the systems of highly nonlinear differential equations with rather free structures (initial value problem). The results of the solution of three sample problems are given.

K e y w o r d s: initial value problem, highly nonlinear equations, numerical methods.

Систему нелинейных уравнений в классической нормальной форме для решения начальной задачи Коши можно записать в виде [1—11]

$$y^{(n)} = f \left[ t, \ y(t), \ y'(t), ..., \ y^{(n-1)}(t) \right].$$

Здесь система разрешена относительно высших производных  $y^{(n)}$ , поэтому программы для ее решения содержатся во многих программных комплексах (Maple, Macsyma, Mathematica, Reduce и др.).

Существенно нелинейными называются уравнения, в состав которых высшие производные искомых функций входят в общем виде [12], т. е. эти уравнения не разрешены относительно высших производных, что создает дополнительные трудности при их численном решении. В [16] описан метод решения таких уравнений, который, однако, имеет один существенный недостаток, а именно: для его применения система уравнений должна удовлетворять одному обязательному условию, которое заключается в том, чтобы в составе системы имелось для каждой неизвестной функции уравнение, содержащее высшую производную этой функции. Ниже описывается метод решения задачи Коши для системы существенно нелинейных дифференциальных уравнений, который свободен от указанного недостатка и основан на использовании формулы дифференцирования (2).

Ставится задача найти на равномерной сетке узлов  $t_1 = 0, t_2, ..., t_N = b$  отрезка [0, b] решение следующей системы M обыкновенных, в общем случае существенно нелинейных дифференциальных уравнений:

$$F[t, y(t), y'(t), ..., y^{(n)}(t)] = 0,$$
(1)

где F — вектор-столбец размера M;  $(y(t))^T = (y_1(t), y_2(t), ..., y_M(t))$ .

Предполагается, что в начальном узле  $t_1=0$  известны значения производных порядка до (n-1)-го включительно всех M функций. Результаты решения необходимо получить в виде таблиц значений функций и их производных в N-узлах сетки, а также их графики.

Для приведения системы (1) к системе обычных нелинейных алгебраических уравнений на каждом этапе решения в алгоритме используются формулы интегрирования или формулы дифференцирования, опубликованные в работах [13—16]. Ниже приводятся эти формулы применительно к поставленной задаче.

Для получения формулы интегрирования предположим, что на отрезке [0,b] вещественной оси t задана равномерная сетка, в N узлах которой известны значения производной k-го порядка функции y=f(t) определенной на [c,d], и значения производных низших порядков в начальном узле  $t_1=c$ . Ставится задача выразить в этих же узлах значения функции и ее производных через узловые значения высшей производной порядка k и производные низших порядков в начальном узле при  $t_1=0$ .

Выполнив процедуру интерполирования производной  $y^{(k)}(t)$  на отрезке [0,b], можно получить формулу интегрирования, которая выражает производные в узлах интерполяции через значения высшей производной k в этих же узлах и производные низших порядков в начальном узле  $x = x_1$  [16]:

$$Y^{(k-r)} = \sum_{m=0}^{r-1} S^m I y_1^{(k-r+m)} + S^r Y^{(k)} \text{ при } r \le k.$$
 (1)

Элементы матрицы интегрирования S — это определенные интегралы по области интегрирования без ее расширения даже при произвольно высокой степени интерполирующих полиномов. К сожалению, эти интегралы невозможно представить в виде математических формул, которые можно было бы запрограммировать.

Формула дифференцирования (2) выражает узловые значения производных через производные в начальной точке  $t=t_1=0$  и значения собственно функции в этих узлах:

$$Y^{(r)} = \sum_{m=0}^{r-1} D^m (E - DS) I y_1^{(r-m)} + D^r Y.$$
 (2)

Видно, что в это выражение, кроме матрицы дифференцирования D, входит также матрица интегрирования S, что впервые наглядно демонстрирует внутреннее единство двух фундаментальных операций математического анализа на сетке узлов без ее расширения — дифференцирования и интегрирования.

При использовании формулы интегрирования (1) дифференциальная задача сводится к алгебраической относительно узловых значений производных высшего порядка, а затем интегрированием вычисляются узловые значения производных низших порядков. Формула дифференцирования (2) позволяет получить соответствующую алгебраическую задачу относительно узловых значений собственно функции, поэтому высшая производная может входить в систему уравнений в произвольном виде. Применение обеих формул исключает необходимость выполнения традиционных нестандартных алгебраических преобразований на краях области при использовании

многочленов высокой степени, как это рекомендуется, например, в [9], так как полученные формулы (1) и (2) не зависят от номеров узлов, расположенных вне области интегрирования, и содержат в явном виде необходимые для постановки граничных условий производные.

Следует заметить, что численный алгоритм может быть основан как на формуле интегрирования (1), так и на формуле дифференцирования (2). Сравнительные расчеты показывают, что (1) при решении нежестких корректных задач дает более высокую точность по сравнению с (2). Но в то же время при решении жестких задач вычислительный процесс, основанный на (2), которая используется в данной работе, более устойчив по сравнению с (1).

Разработанная в настоящей работе программа для персонального компьютера работает в автоматическом режиме, т. е. для получения результатов решения в табличной или графической форме нет необходимости выбирать метод решения, писать и отлаживать программу — достаточно в соответствии с инструкцией набрать на дисплее систему уравнений в обычной математической форме и нажать «ПУСК».

**Тестовые примеры.** Ниже приведены результаты решения примеров трех систем существенно нелинейных дифференциальных уравнений при заданных значениях длины отрезка интегрирования [0,b] и числа узлов N на оси t. Представлены максимальные значения абсолютной  $\Delta$  ошибки для каждой функции.

 $\Pi$  р и м е р 1. Начальная задача для системы двух существенно нелинейной системы дифференциальных уравнений с неизвестными функциями u(t) и v(t):

$$u'' + v''(u+1/(t+1)) + \exp(v) - \exp(\exp(-t)) + \sin t(1 - \exp(-t)) - \exp(-t)/(t+1) = 0,$$
  
 
$$v' + \sin u + uv + \exp(-t) - \sin(\sin t)) - \sin t \cdot \exp(-t) = 0.$$

Начальные условия: 
$$u(0) = 0$$
,  $u'(0) = 1$ ;  $v(0) = 1$ ,  $v'(0) = -1$ .

Точное решение:  $u(t) = \sin t$ ;  $v(t) = \exp(-t)$ .

Эта система не может быть решена классическими методами [1—11], а также с применением формулы интегрирования (1), которая используется в работе [16], так как высшая производная второй функции v'' содержится только в первом уравнении, но не во втором. Кроме того, эта система существенно нелинейная, потому что высшая производная второй функции v'' входит в первое уравнение в нелинейном виде.

Максимальные ошибки при b = 5:

для функции 
$$u$$
:  $\Delta_{N=15}=5.9\cdot 10^{-6},~\Delta_{N=21}=7.0\cdot 10^{-7},~\Delta_{N=31}=8.5\cdot 10^{-10};$  для функции  $v$ :  $\Delta_{N=15}=1.5\cdot 10^{-5},~\Delta_{N=21}=1.8\cdot 10^{-6},~\Delta_{N=31}=1.9\cdot 10^{-9}.$ 

Решение этой системы уравнений не вполне устойчивое. При N<15 и N>31 решение получить не удается, так как при использовании интерполяционных полиномов высокой степени (n>8) необходимо использовать более густую сетку узлов, а при N>31 ошибка быстро возрастает вследствие недостаточно высокой точности арифметического устройства персонального компьютера.

 $\Pi$  р и м е р 2. Начальная задача для существенно нелинейной системы трех дифференциальных уравнений с неизвестными функциями u(t), v(t) и w(t):

$$u'' + w'' + \exp(0,25v) + 0.04\sin(0,2t) - \exp(0,25(t+4)) = 0,$$
  
$$v' - u' + 0.2\cos(0,2t) - 1 = 0,$$

$$w'(1-u) + v(v'+1) + 2t\sin(0,2t) + 6t - 8 = 0.$$

Начальные условия: u(0) = 5, u'(0) = 0, 2; v(0) = 4, v'(0) = 1; w(0) = -1.

Точное решение:  $u(t) = \sin(0,2t) + 5$ ; v(t) = t + 4;  $w(t) = t^2 - 1$ .

Максимальные ошибки при b = 5:

для функции 
$$u$$
:  $\Delta_{N=11}=6,0\cdot 10^{-13},\ \Delta_{N=31}=4,0\cdot 10^{-15},\ \Delta_{N=91}=9,0\cdot 10^{-14};$ 

для функции 
$$v$$
:  $\Delta_{N=11} = 5.0 \cdot 10^{-14}$ ,  $\Delta_{N=31} = 4.6 \cdot 10^{-14}$ ,  $\Delta_{N=91} = 8.8 \cdot 10^{-14}$ ;

для функции 
$$w: \Delta_{N=11} = 9,0 \cdot 10^{-13}, \ \Delta_{N=31} = 5,9 \cdot 10^{-13}, \ \Delta_{N=91} = 1,6 \cdot 10^{-13}.$$

Решение этой системы уравнений устойчивое, но даже при сильном сгущении сетки узлов ошибки не уменьшаются по причине ограниченной точности арифметического устройства компьютера.

 $\Pi$  р и м е р 3. Начальная задача для одного существенно нелинейного дифференциального уравнения 4-го порядка с неизвестной функцией u(t):

$$u^{(IV)}(u+1) - 0.0625 \sin(0.5t)(\sin(0.4t) + 1) = 0.$$

Начальные условия: u(0) = 0, u'(0) = 0.5 u''(0) = 0, u'''(0) = -0.125.

Точное решение:  $u(t) = \sin(0.5t)$ .

Решение этого уравнения является не вполне устойчивым. Ниже приводятся значения максимальной ошибки для двух величин отрезка интегрирования b:

$$b = 5$$
:  $\Delta_{N=5} = 2,8 \cdot 10^{-3}$ ,  $\Delta_{N=11} = 2,1 \cdot 10^{-9}$ ,  $\Delta_{N=21} = 3,1 \cdot 10^{-12}$ ;  
 $b = 10$ :  $\Delta_{N=11} = 1,4 \cdot 10^{-2}$ ,  $\Delta_{N=21} = 4,8 \cdot 10^{-8}$ .

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Runge C. Ueber die numerisce Auflosing von Differentialgleichungen // Math. Ann. 1895. V. 46, P. 167—178.
- 2. Kutta W. Betrag zur naherungsweisen Integration totaler Differentialgleichungen // Z. Math. Phys. 1901. V. 46. P. 435—453.
- 3. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений / под. ред. Дж. Холла, Дж. Уатта. М. : Мир, 1979. 312 с.
- 4. *Хайрер Э.*, *Ваннер Г*. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. М. : Мир, 1999. 512 с.
- 5. Эльсгольц Л. Э., Норкин С. Б. Введение в теорию дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом. М.: Наука, 1971. 296 с.
- 6. Деккер K., Вервер S. Устойчивость методов Рунге Кутты для жестких нелинейных дифференциальных уравнений. М. : Мир, 1988.
- 7. Конторович Л. В., Крылов В. И. Приближенные методы высшего анализа. М.: Гостех-издат, 1949.
  - 8. *Березин И. С., Жидков Н. П.* Методы вычислений. Т. 2. М.: Физматгиз, 1962. 639 с.
  - 9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1968.
  - 10. Бахвалов Н. С. Численные методы. Т. 1. М.: Наука, 1973. 631 с.

- 11. Калиткин Н. Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.
- 12. Математическая энциклопедия. М., 1982.
- 13. *Бандурин Н. Г.* Программа для автоматического решения жестких нелинейных задач // Известия ВолгГТУ. 2009. № 12. С. 5—8.
- 14. *Бандурин Н. Г.* Численное решение существенно нелинейных интегродифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом // Вычислительные технологии. 2010. № 3. С. 31—38.
- 15. *Бандурин Н. Г.* Метод и программа для решения систем обыкновенных нелинейных интегро-алгебраических уравнений общего вида // Изв. вузов. Северокавказский регион. 2011. № 4. С. 11—14.
- 16. *Бандурин Н. Г., Гуреева Н. А.* Метод и пакет программ для численного решения систем существенно нелинейных обыкновенных интегро-дифференциально-алгебраических уравнений // Математическое моделирование. 2012. Т. 24. № 2. С. 3—16.
- 1. Runge C. Ueber die numerisce Auflosing von Differentialgleichungen // Math. Ann. 1895. V. 46. P. 167—178.
- 2. Kutta W. Betrag zur naherungsweisen Integration totaler Differentialgleichungen // Z. Math. Phys. 1901. V. 46. P. 435—453.
- 3. Sovremennye chislennye metody reshenija obyknovennyh differencial'nyh uravnenij / pod. red. Dzh. Holla, Dzh. Uatta. M.: Mir, 1979. 312 s.
- 4. *Hajrer Je., Vanner G.* Reshenie obyknovennyh differencial'nyh uravnenij. Zhestkie i differencial'no-algebraicheskie zadachi. M.: Mir, 1999. 512 s.
- 5. Jełsgol'c L. Je., Norkin S. B. Vvedenie v teoriju differencial'nyh uravnenij s otklonjajushhimsja argumentom. M.: Nauka, 1971. 296 s.
- 6. Dekker K., Verver Ja. Ustojchivost' metodov Runge—Kutty dlja zhestkih nelinejnyh differencial'nyh uravnenij. M.: Mir, 1988.
  - 7. Kontorovich L. V., Krylov V. I. Priblizhennye metody vysshego analiza. M.: Gostehizdat, 1949.
  - 8. Berezin I. S., Zhidkov N. P. Metody vychislenij. T. 2. M.: Fizmatgiz, 1962. 639 s.
  - 9. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike. M.: Nauka, 1968.
  - 10. Bahvalov N. S. Chislennye metody. T. 1. M.: Nauka, 1973. 631 s.
  - 11. Kalitkin N. N. Chislennye metody. M.: Nauka, 1978. 512 s.
  - 12. Matematicheskaja jenciklopedija. M., 1982.
- 13. *Bandurin N. G.* Programma dlja avtomaticheskogo reshenija zhestkih nelinejnyh zadach // Izvestiya VolgGTU. 2009. № 12. S. 5—8.
- 14. Bandurin N. G. Chislennoe reshenie sushhestvenno nelinejnyh integrodifferencial'nyh uravnenij s zapazdyvajushhim argumentom // Vychislitel'nye tehnologii. 2010. N2 S. S. 31—38.
- 15. Bandurin N. G. Metod i programma dlja reshenija sistem obyknovennyh nelinejnyh integro-algebraicheskih uravnenij obshhego vida // Izv. vuzov. Severokavkazskij region. 2011. № 4. S. 11—14.
- 16. *Bandurin N. G., Gureeva N. A.* Metod i paket programm dlja chislennogo reshenija sistem sushhestvenno nelinejnyh obyknovennyh integro-differencial'no-algebraicheskih uravnenij // Matematicheskoe modelirovanie. 2012. T. 24. № 2. S. 3—16.

© Бандурин Н. Г., Калашников С. Ю., 2014

Поступила в редакцию в мае 2014 г.

#### Ссылка для иитирования:

Бандурин Н. Г., Калашников С. Ю. Численный метод 9-го порядка точности для решения одномерных существенно нелинейных дифференциальных уравнений // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 86—90.

УДК 539.3:624.072.14

#### Г. И. Беликов

# ОСНОВЫ ТЕОРИИ УПРУГИХ СЕТЧАТЫХ ПЛАСТИНОК С КОНЕЧНОЙ СДВИГОВОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ

Излагаются основы теории тонких упругих сетчатых пластинок на базе сдвиговой и континуальной расчетной моделей. Если модуль поперечного сдвига независим от модуля Юнга в срединной поверхности, то автоматически учитывается трансверсальная изотропия материала пластинки. Уточнена классическая теория тонких упругих сетчатых пластинок. Коррекция классической теории обусловлена учетом конечной сдвиговой жесткости.

Ключевые слова: уточненная теория, сдвиговая и континуальная расчетная модель, трансверсально-изотропная упругая сетчатая пластинка, оценка коррекции.

The author represents the foundations of the theory of elastic mesh plates based on the calculated shear and continuum models. Taking the transverse shear modulus independent of Young's modulus in the middle surface, then transversal isotropy of the plate material is considered automatically. The classical theory of elastic mesh plates is verified. The correction to the classical theory is proved by the finite shear rigidity.

 $K\,e\,y\,\,$  words: refined theory, shear and continual calculation model, transversely isotropic elastic mesh plate, estimated correction.

Классическая теория пластинок и оболочек, основанная на гипотезах Кирхгофа — Лява, получила широкое распространение. Однако эта теория не является полной. Поэтому в ряде исследований используются различные варианты уточненных теорий с применением моделей, менее жестких, чем классическая теория.

С внедрением в инженерную практику новых композиционных материалов значительно возрос интерес к построению соответствующей теории расчета пластин, выполненных из этих материалов, учитывающей особенности их поведения и, в частности, низкую (трансверсальную) сдвиговую жесткость. Так, например, в теории трехслойных пластин, средний слой которых податлив к сдвигу, нельзя пренебрегать деформациями, соответствующими касательным напряжениям вдоль нормали. При исследовании динамических процессов в пластинах, связанных с распространением волн деформаций, важное значение приобретают деформации сдвига, поперечные силы или касательные напряжения. Учет деформаций сдвига по толщине пластинки надо рассматривать и тогда, когда требуется принимать во внимание инерцию вращения. Отметим также, что при поперечном изгибе стержней небольшой длины, имеющих малую жесткость на сдвиг, перемещения, обусловленные нормальными напряжениями, оказываются соизмеримыми с составляющими от сдвига и ими пренебрегать нельзя.

Данная работа посвящена изложению варианта основ уточненной теории упругих однослойных сетчатых пластинок с конечной сдвиговой жесткостью как некоторых континуальных систем. Принимая, что модуль поперечного сдвига независим от модуля Юнга к срединной поверхности, будем автоматически учитывать трансверсальную изотропию материала пластинки [1].

Сетчатые пластины представляют собой сложные стержневые конструкции. Оси стержней образуют семейство густо расположенных прямых в срединной поверхности пластины. В работе предлагается учитывать наличие

поперечного сдвига стержней сетчатой пластины, следовательно, и ее расчетной модели по известному методу (кинематическая модель) С. П. Тимошенко [2]. Континуальная расчетная модель принята по теории Г. И. Пшеничнова [3]. Область применимости такой расчетной модели достаточно широка [3—5]. Следует отметить, для принятой модели Тимошенко характерно четкое разделение перемещений, вызванных классическими усилиями, с одной стороны, и поперечными касательными силами, с другой.

Пусть пластинка загружена поверхностными силами, которые вызывают как плоские, так и изгибные деформации пластинки. Срединная поверхность пластинки совпадает с координатной плоскостью 0xy, а координатная ось z направлена вверх. Координатные линии x, y и нормаль к срединной поверхности представляют главные направления упругости. Примем, что возникающие усилия и моменты равномерно распределяются по всему сечению модели.

В основу предлагаемой здесь теории трансверсально конструктивно анизотропных пластинок ставятся следующие предположения:

- а) нормальные к срединной плоскости перемещения w не зависят от координаты z;
- б) касательные напряжения т или соответствующие деформации меняются по заданному закону.

Первое предположение совпадает с соответствующими предположениями классической теории. Второе предположение открывает возможности учета явлений, связанных с поперечными сдвигами.

При учете сдвига вместо гипотезы плоских сечений применяем предположение, что прямолинейные волокна, перпендикулярные нейтральной линии стержня, остаются после деформации также перпендикулярными. Отклонение их от оси равно осредненному углу поперечного сдвига β.

$$\beta = \theta + \frac{\partial w}{\partial x},\tag{1}$$

где  $\theta$  — угол поворота отрезка нормали к нейтральной оси стержня.

Закон Гука при сдвиге имеет вид  $\tau = \beta G$ . Закон изменения поперечных касательных напряжений по толщине стержня по кинематической гипотезе С. П. Тимошенко имеет вид  $\tau = O/k^2 A$ .

Угол наклона линии прогибов стержня, обусловленных только влиянием сдвига, равен углу поперечного сдвига на нейтральной оси  $\beta$  (равномерно распределен по толщине стержня):

$$\beta = \frac{Q}{k^2 G A}$$
, тогда  $Q = k^2 G A \beta$ , (2)

где  $k^2$  — числовой коэффициент, учитывающий форму поперечного сечения стержня.

Пусть сетчатая пластинка состоит из четырех семейств стержней (n=4, рис. 1). Стержни первого и второго семейств стержней одинаковы. Топология сетки имеет следующие параметры:

$$\varphi_1 = -\varphi_2 = \varphi$$
,  $\varphi_3 = \pi/2$ ,  $\varphi_4 = 0$ ,  $a_1 = a_2$ ,  $a_4 = a_1/2\cos\varphi$ ,  $a_3 = a_1/2\sin\varphi$ , (3)

где  $\varphi_i$  — угол между осью x и осью стержня (отсчитывается от оси x в направлении оси y);  $a_i$  — расстояние между осями соседних стержней.

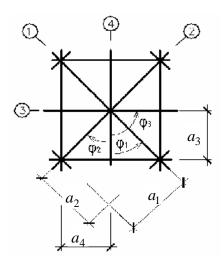


Рис. 1. Сетка пластины, тип 1

Рассмотрим случай деформированного состояния пластинки (слабый изгиб). При рассмотрении расчетной модели сетчатой пластинки будем использовать три группы уравнений: статические, или уравнения движения, геометрические уравнения и уравнения состояния.

Первые две группы уравнений совпадают с соответствующими уравнениями теории сплошных пластинок.

Статические уравнения:

$$\frac{\partial N_1}{\partial x} + \frac{\partial S_2}{\partial y} + X = 0; \quad \frac{\partial N_2}{\partial y} + \frac{\partial S_1}{\partial x} + Y = 0;$$

$$\frac{\partial Q_1}{\partial x} + \frac{\partial Q_2}{\partial y} + Z = 0; \quad \frac{\partial H_1}{\partial x} - \frac{\partial M_2}{\partial y} - Q_2 = 0; \quad \frac{\partial H_2}{\partial x} - \frac{\partial M_1}{\partial y} - Q_1 = 0;$$

$$S_1 - S_2 = 0.$$
(4)

Геометрические уравнения

$$\varepsilon_{1} = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_{2} = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \omega = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x};$$

$$\chi_{1} = \frac{\partial \theta_{1}}{\partial x}; \quad \chi_{2} = \frac{\partial \theta_{2}}{\partial y}; \quad 2\tau = \frac{\partial \theta_{2}}{\partial x} + \frac{\partial \theta_{1}}{\partial y},$$
(5)

где  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  — углы поворота отрезка нормали к срединной плоскости пластинки соответственно в плоскостях y = const и x = const.

Соответствующие углы поперечного сдвига расчетной модели сетчатой пластинки равны

$$\beta_1 = \theta_1 + \frac{\partial w}{\partial x}, \quad \beta_2 = \theta_2 + \frac{\partial w}{\partial y},$$
 (6)

где w — компонент деформации срединной поверхности (прогиб).

Далее будем считать, что нормаль при таком повороте не меняет своей длины; это допущение входит в систему гипотез Кирхгофа — Лява [1].

Уравнения состояния (соотношения упругости) оказываются более сложными и зависят от структуры сетки и ее материала [3].

Усилия и моменты, возникающие в поперечном сечении стержня i-го семейства в зависимости от компонентов деформации, примем в виде:

$$N^* = E_i A_i \varepsilon_i^*, \quad Q_i^* = k_i^2 G_i A_i \beta_i^*, \quad M_i^* = -E_i J_{1i} \nabla_i \theta_i^*, \quad H_i^* = G_i J_{2i} \tau_i^*, \tag{7}$$

где  $\theta_1^* = \theta_1 \cos \phi_i + \theta_2 \sin \phi_i$ ,  $\beta_1^* = \beta_1 \cos \phi_i + \beta_2 \sin \phi_i$ ,  $\phi_i$  — угол между осью x и осью стержня, оператор дифференцирования  $\Delta_i = \cos \phi_i \frac{\partial}{\partial x} + \sin \phi_i \frac{\partial}{\partial y}$ .

Используя формулы преобразования компонентов деформации теории упругости, а также линейный закон их изменения по нормали к срединной поверхности, можно получить для компонентов деформации оси стержня итого семейства сетчатой пластинки:

$$\varepsilon_{i}^{*} = \varepsilon_{1} \cos^{2} \varphi_{i} + \varepsilon_{2} \sin^{2} \varphi_{i} + \omega \sin \varphi_{i} \cos \varphi_{i}, 
\chi_{i}^{*} = \chi_{1} \cos^{2} \varphi_{i} + \chi_{2} \sin^{2} \varphi_{i} + \tau \sin 2\varphi_{i}, 
\tau_{i}^{*} = (\chi_{2} - \chi_{1}) \sin \varphi_{i} \cos \varphi_{i} + \tau \cos 2\varphi_{i}.$$
(8)

Если подставить в соотношения (5) работы [3] значения (7) с учетом (8), получим следующие уравнения состояния расчетной модели предлагаемой теории сетчатых структурно неоднородных пластинок (сетка состоит из четырех семейств стержней):

$$\begin{split} N_1 &= C_{11}\varepsilon_1 + C_{12}\varepsilon_2 = C_{11}\frac{\partial u}{\partial x} + C_{12}\frac{\partial v}{\partial y}, \ N_2 = C_{12}\varepsilon_1 + C_{22}\varepsilon_2 = C_{12}\frac{\partial u}{\partial x} + C_{22}\frac{\partial v}{\partial y}, \\ S_1 &= S_2 = C_{66}\omega = C_{66}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right), \\ M_1 &= \beta_{11}\frac{\partial \theta_1}{\partial x} + \beta_{12}\frac{\partial \theta_2}{\partial y}, \ M_2 = \beta_{12}\frac{\partial \theta_1}{\partial x} + \beta_{22}\frac{\partial \theta_2}{\partial y}, \\ H_1 &= \beta_{31}\left(\frac{\partial \theta_2}{\partial x} + \frac{\partial \theta_1}{\partial y}\right), \ H_2 = \beta_{41}\left(\frac{\partial \theta_2}{\partial x} + \frac{\partial \theta_1}{\partial y}\right), \\ Q_1 &= \beta_{51}\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \theta_1\right), \ Q_2 = \beta_{61}\left(\frac{\partial w}{\partial y} + \theta_2\right), \\ \Gamma \text{Де} \ C_{11} &= \frac{2E_1A_1}{a_1}\left(\cos^4 \phi_1 + \frac{E_4A_4}{E_1A_1}\cos\phi_1\right), \ C_{12} &= C_{66} = \frac{2E_1A_1}{a_1}\sin^2 \phi_i \cos^2 \phi_i, \\ C_{22} &= \frac{2E_1A_1}{a_1}\left(\sin^4 \phi_1 + \frac{E_3A_3}{E_1A_1}\sin\phi_1\right), \ \beta_{12} &= -\frac{E_1J_{11}\sin^2 2\phi_1}{2a_1}\left(1 - \frac{G_1J_{31}}{E_1J_{11}}\right), \end{split}$$

$$\begin{split} \beta_{11} &= -\frac{2E_1J_{11}}{a_1} \left( \cos^4 \varphi_1 + \frac{E_4J_{14}}{E_1J_{11}} \cos \varphi_1 + \frac{G_1J_{31}}{E_1J_{11}} \frac{\sin^2 2\varphi_1}{4} \right), \\ \beta_{22} &= -\frac{2E_1J_{11}}{a_1} \left( \sin^4 \varphi_1 + \frac{E_3J_{13}}{E_1J_{11}} \sin \varphi_1 + \frac{G_1J_{31}}{E_1J_{11}} \frac{\sin^2 2\varphi_1}{4} \right), \\ \beta_{31} &= -\frac{E_1J_{11}}{a_1} \left( 2\sin^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_1 + \frac{G_1J_{31}}{E_1J_{11}} \cos^2 \varphi_1 \cos 2\varphi_1 + \frac{G_4J_{34}}{E_1J_{11}} \cos \varphi_1 \right), \\ \beta_{41} &= -\frac{E_1J_{11}}{a_1} \left( 2\sin^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_1 + \frac{G_1J_{31}}{E_1J_{11}} \sin^2 \varphi_1 \cos 2\varphi_1 + \frac{G_3J_{33}}{E_1J_{11}} \sin \varphi_1 \right), \\ K^* &= \frac{k_1^2G_1A_1}{a_1}, \\ \beta_{51} &= 2K^* \left( \cos^2 \varphi_1 + \frac{k_4^2G_4A_4}{k_1^2G_1A_1} \cos \varphi_1 \right), \quad \beta_{61} &= 2K^* \left( \sin^2 \varphi_1 + \frac{k_3^2G_3A_3}{k_1^2G_1A_1} \sin \varphi_1 \right). \end{split}$$

Здесь приняты следущие обозначения:  $E_i$ ,  $G_i$  — модуль Юнга и модуль упругости при сдвиге материала;  $A_i$ ,  $J_{1i}$ ,  $J_{3i}$  — площадь, главный центральный момент инерции, соответствующий изгибу в нормальной к срединной поверхности плоскости, и момент инерции при кручении поперечного сечения стержня;  $a_1$  — расстояние между осями стержней первого семейства.

Приведем исходную систему уравнений (4), (5), (9) теории сетчатых пластинок с конечной сдвиговой жесткостью к уравнениям, содержащим только обобщенные перемещения u, v, w,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ . Для этого, подставив соотношения (9) в уравнения (4), получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$L_{11}u + L_{12}v + X = 0;$$

$$L_{21}u + L_{22}v + Y = 0;$$

$$L_{33}w + L_{34}\theta_1 + L_{35}\theta_2 + Z = 0;$$

$$L_{43}w + L_{44}\theta_1 + L_{45}\theta_2 = 0;$$

$$L_{53}w + L_{54}\theta_1 + L_{55}\theta_2 = 0,$$
(11)

где дифференциальные операторы имеют вид:

$$L_{11} = C_{11} \frac{\partial^{2}}{\partial x^{2}} + C_{66} \frac{\partial^{2}}{\partial y^{2}}, \ L_{12} = L_{21} = (C_{12} + C_{66}) \frac{\partial^{2}}{\partial x \partial y}, \ L_{22} = C_{66} \frac{\partial^{2}}{\partial x^{2}} + C_{22} \frac{\partial^{2}}{\partial y^{2}},$$

$$L_{33} = \beta_{51} \frac{\partial^{2}}{\partial x^{2}} + \beta_{61} \frac{\partial^{2}}{\partial y^{2}}, \ L_{34} = \beta_{51} \frac{\partial}{\partial x}, \ L_{35} = \beta_{61} \frac{\partial}{\partial y}, \ L_{43} = -\beta_{61} \frac{\partial}{\partial y},$$

$$L_{44} = (\beta_{31} - \beta_{12}) \frac{\partial^{2}}{\partial x \partial y}, \ L_{45} = \beta_{31} \frac{\partial^{2}}{\partial x^{2}} - \beta_{22} \frac{\partial^{2}}{\partial y^{2}} - \beta_{61}, \ L_{53} = -\beta_{51} \frac{\partial}{\partial x},$$

$$L_{54} = -\beta_{11} \frac{\partial^{2}}{\partial x^{2}} + \beta_{41} \frac{\partial^{2}}{\partial y^{2}} - \beta_{51}, \ L_{55} = (\beta_{41} - \beta_{12}) \frac{\partial^{2}}{\partial x \partial y}.$$
(12)

При рассмотрении плоской задачи для прямоугольной сетчатой пластины дифференциальные уравнения равновесия имеют вид (10) при компонентах деформации  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\omega$  (5), соответствующих плоской задаче. Уравнения состояния пластинки можно получить по формулам (2.4), (2.11), (11.2) и (5.4) работы [3]. Используя граничные условия, можно провести исследования с учетом и без учета жесткости стержней на изгиб в плоскости пластинки.

При рассмотрении поперечного изгиба для прямоугольной сетчатой пластины с учетом сдвиговой жесткости и жесткости стержней на кручение дифференциальные уравнения равновесия имеют вид (11) при компонентах изгибной деформации  $\chi_1$ ,  $\chi_2$ ,  $\tau$  (5) и углах поперечного сдвига  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  (6).

Приведем некоторые однородные граничные условия. Для простоты записи будем полагать, что край пластинки совпадает с линией x = const.

А. Свободно опертый край. В этом случае должны быть выполнены условия:  $w=0;\, M_1=0;\, H_1=0$  .

Б. Жестко защемленный край. Закреплен элемент срединной поверхности:  $w=0,~\theta_2=0$  ,  $\frac{\partial w}{\partial x}=0$ .

В. Шарнирно-закрепленный край. Для шарнирно-закрепленного края имеем:  $w=0,\ M_1=0,\ \theta_2=0.$ 

Совершенно аналогично записываются граничные условия для края пластинки, совпадающего с линией y = const.

Уравнения состояния позволяют при исследовании пластинок с сетками из четырех, трех или двух семейств стержней использовать линейную теорию пластинок и полученные решения многочисленных задач.

Пусть прямоугольная пластинка (тип сетки № 1) шарнирно оперта по всем четырем сторонам (x=0, x=a и y=0, y=b) и изгибается нагрузкой, распределенной по произвольному закону Z=q(x,y).

Система дифференциальных уравнений рассматриваемой задачи будет иметь вид (10), и ее надо интегрировать при граничных условиях

$$w = \theta_2 = M_1 = 0$$
 при  $x = 0$ ,  $x = a$  и  $w = \theta_1 = M_2 = 0$  при  $y = 0$ ,  $y = b$ . (13)

Граничные условия (13) будут удовлетворены, если решение системы (11) представить в виде следующих тригонометрических рядов:

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}, \quad \theta_1 = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} B_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b},$$

$$\theta_2 = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b}.$$
(14)

Для определения неизвестных коэффициентов  $A_{mn}$ ,  $B_{mn}$ ,  $C_{mn}$  разложим функцию нагрузки q(x,y) в аналогичный ряд:

$$Z = q(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b},$$
(15)

где

$$a_{mn} = \frac{4}{ab} \int_{0}^{a} \int_{0}^{b} f_{xy} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} dx dy.$$

Подставим значения w,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ , Z соответственно из (14) и (15) в систему уравнений (11), при этом полагая, что функция q(x,y) по одному разу дифференцируема по x или по y.

Уравнения основной системы получаем в виде:

$$\begin{split} a_{11}A_{mn} + a_{12}B_{mn} + a_{13}C_{mn} &= a_{mn}\,,\\ a_{21}A_{mn} + a_{22}B_{mn} + a_{23}C_{mn} &= 0\,,\\ a_{31}A_{mn} + a_{32}B_{mn} + a_{33}C_{mn} &= 0\,,\\ &\Box a_{11} = \beta_{51}\frac{m^2\pi^2}{a^2} + \beta_{61}\frac{n^2\pi^2}{b^2}\,, \quad a_{12} &= \beta_{51}\frac{m\pi}{a}\,, \quad a_{13} &= \beta_{61}\frac{n\pi}{b}\,,\\ a_{21} &= -\beta_{61}\frac{m\pi}{a}\,, \quad a_{22} &= -\left(\beta_{31} - \beta_{12}\right)\frac{mn\pi^2}{ab}\,, \quad a_{23} &= -\beta_{31}\frac{m^2\pi^2}{a^2} + \beta_{22}\frac{n^2\pi^2}{b^2} - \beta_{61}\,,\\ a_{31} &= -\beta_{51}\frac{m\pi}{a}\,, \quad a_{32} &= \beta_{11}\frac{m^2\pi^2}{a^2} - \beta_{41}\frac{n^2\pi^2}{b^2} - \beta_{51}\,, \quad a_{33} &= -\gamma_{22}\frac{n^2\pi^2}{b^2} + \gamma_{31}\frac{m^2\pi^2}{a^2} + K_{13}^* \end{split}$$

Из (16) определяются коэффициенты  $A_{mn}$ ,  $B_{mn}$ ,  $C_{mn}$  при любых значениях m, n.

$$A_{mn} = \frac{\Delta_{1mn}}{\Delta_{0mn}} a_{mn}, \ B_{mn} = \frac{\Delta_{2mn}}{\Delta_{0mn}} a_{mn}, \ C_{mn} = \frac{\Delta_{3mn}}{\Delta_{0mn}} a_{mn},$$
 (17)

где 
$$\Delta_{1mn}=a_{22}a_{33}-a_{23}^2$$
 ,  $\Delta_{2mn}=-a_{12}a_{33}+a_{23}a_{13}$  ,  $\Delta_{3mn}=-a_{12}a_{22}+a_{13}a_{22}$  ,

$$\Delta_{0mn} = a_{11} \left( a_{22} a_{33} - a_{23}^2 \right) - a_{12} \left( a_{12} a_{33} - a_{23} a_{13} \right) + a_{13} \left( a_{12} a_{23} - a_{22} a_{13} \right).$$

Следовательно, становятся известными обобщенные перемещения w,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  (14).

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Delta_{1mn}}{\Delta_{0mn}} a_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b},$$

$$\theta_1 = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Delta_{2mn}}{A_{0mn}} a_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b},$$

$$\theta_2 = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_{3mn}}{A_{0mn}} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \,. \tag{18}$$

Используя (4), получим значения соответствующих углов поперечного сдвига расчетной модели сетчатой пластинки:

$$\beta_{1} = \theta_{1} + \frac{\partial w}{\partial x} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{\Delta_{2mn}}{A_{0mn}} + \frac{\Delta_{1mn}}{A_{0mn}} \frac{m\pi}{a} \right) a_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} ,$$

$$\beta_{2} = \theta_{2} + \frac{\partial w}{\partial y} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{\Delta_{3mn}}{A_{0mn}} + \frac{\Delta_{1mn}}{A_{0mn}} \frac{n\pi}{b} \right) a_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b}$$

$$(19)$$

Подставляя полученные значения искомых функций w,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  в (9), для остальных расчетных величин легко записать:

$$M_{1} = -\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \beta_{11} \frac{m\pi}{a} \Delta_{2mn} + \beta_{12} \frac{n\pi}{b} \Delta_{3mn} \right] \frac{a_{mn}}{A_{0mn}} \sin \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{b} y,$$

$$M_{2} = -\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \beta_{12} \frac{m\pi}{a} \Delta_{2mn} + \beta_{22} \frac{n\pi}{b} \Delta_{3mn} \right] \frac{a_{mn}}{A_{0mn}} \sin \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{b} y,$$

$$H_{1} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \beta_{31} \frac{m\pi}{a} \Delta_{3mn} + \frac{n\pi}{b} \Delta_{2mn} \right] \frac{a_{mn}}{A_{0mn}} \cos \frac{m\pi}{a} x \cos \frac{n\pi}{b} y,$$

$$H_{2} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \beta_{41} \frac{m\pi}{a} \Delta_{3mn} + \frac{n\pi}{b} \Delta_{2mn} \right] \frac{a_{mn}}{A_{0mn}} \cos \frac{m\pi}{a} x \cos \frac{n\pi}{b} y,$$

$$Q_{1} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \beta_{51} \left( \frac{m\pi}{a} \Delta_{1mn} + \Delta_{2mn} \right) \right] \frac{a_{mn}}{A_{0mn}} \cos \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{b} y,$$

$$Q_{2} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \beta_{61} \left( \frac{n\pi}{b} \Delta_{1mn} + \Delta_{2mn} \right) \right] \frac{a_{mn}}{A_{0mn}} \cos \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{b} y.$$
(20)

В приведенные выше выражения расчетных величин входят коэффициенты  $a_{mn}$ , которые зависят от закона распределения внешней нагрузки.

Усилия и моменты в стержнях сетчатой пластины определяются по (7), (8).

Результаты могут быть использованы и для расчета сетчатых прямоугольных пластинок, выполненных из композиционных материалов, под действием распределенных нагрузок при различных отношениях E/G.

Среди пластинок одинаковой массы можно определить рациональные пластинки по различным критериям: тип пластики, тип сетки, угол сетки и распределение материала по стержням сетки.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1.  $\ensuremath{\textit{Пелех}}\xspace E.\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace\xspace$
- 2. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М. : Строийиздат, 1972. 625 с.
- 3. *Пшеничнов Г. И.* Теория тонких упругих сетчатых оболочек и пластинок. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. 332 с.
- 4. *Беликов Г. И.* Статика, динамика и устойчивость сетчатых и подкрепленных оболочек с учетом поперечного сдвига. Волгоград : ВолгГАСА, 2003. 298 с.
- 5. *Беликов Г. И.* Расчет сетчатых пластин на изгиб с учетом поперечного сдвига // Вестник Волгогр. гос. архит-строит. ун-та. Сер: Стр-во и архит. 2013. Вып. 32(51). С. 93—100.

- $1.\,\textit{Pelekh B. L.}$  Teoriya obolochek s<br/> konechnoy sdvigovoy zhestkost'yu. Kiev : Naukova dumka, 1973. 248 s.
  - 2. Timoshenko S. P., Voynovskiy-Kriger S. Plastinki i obolochki. M.: Stroiyizdat, 1972. 625 s.
- 3. *Pshenichnov G. I.* Teoriya tonkikh uprugikh setchatykh obolochek i plastinok. M.: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1982. 332 s.
- 4.  $Belikov\ G.\ I.$  Statika, dinamika i ustoychivosť setchatykh i podkreplennykh obolochek s uchetom poperechnogo sdviga. Volgograd : VolgGASA, 2003. 298 s.
- 5. *Belikov G. I.* Raschet setchatykh plastin na izgib s uchetom poperechnogo sdviga // Vestnik Volgogr. gos. arkhit-stroit. un-ta. Ser: Str-vo i arkhit. 2013. Vyp. 32(51). S. 93—100.

© Беликов Г. И., 2014

Поступила в редакцию в феврале 2014 г.

# Ссылка для цитирования:

*Беликов Г. И.* Основы теории упругих сетчатых пластинок с конечной сдвиговой жесткостью // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер. : Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 91—99.

УДК 621.837

#### В. И. Богданов

# СИНТЕЗ МЕХАНИЗМОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВ С ОСТОВОМ РЕГУЛИРУЕМОЙ КОНСТРУКЦИИ

Рассматривается синтез прямолинейно-направляющего механизма для устройств с остовом регулируемой конструкции, дополненного свойством постоянства длины контура. Получена целевая функция, позволяющая оптимизационным методом найти значения параметров, при которых проявляется свойство постоянства длины контура механизма. Показано практическое применение механизма в устройстве с остовом регулируемой конструкции.

Ключевые слова: остов регулируемой конструкции, кривошипно-ползунный направляющий механизм, постоянная длина контура.

The author discusses the synthesis of straight-line generating mechanism for devices with the frame of regulative construction, which possesses the property of stability of contour length. The efficiency function, allowing to find the values of parameters by optimization method, at which the property of stability of contour length can be obtained, is received. Practical use of the mechanism in the device with a frame of regulative construction is shown.

 $K\ e\ y\ w\ o\ r\ d\ s$ : frame of regulative construction, crank driven generating mechanism, stability of contour length.

Технологические параметры и функциональные возможности различных машин и устройств расширяются при выполнении их остова (рамы) в виде регулируемых переменной конфигурации конструкций, представляющих механизмы с двумя и более кинематическими свойствами.

Цель работы — синтез механизма для устройств с остовом регулируемой конструкции, сочетающего два кинематических свойства — прямолинейное перемещение концевых точек шатунов и постоянство длины контура механизма независимо от изменения его конфигурации.

Структурный синтез механизма с прямолинейным движением концевых точек отдельных звеньев и постоянной длиной контура выполнялся эвристическими методами на основе анализа кинематики кривошипно-ползунного прямолинейно-направляющего механизма Эванса, обеспечивающего теоретически точную прямолинейную траекторию движения концевой точки шатуна по оси *X*. К двум симметричным относительно оси *Y* механизмам Эванса добавлены вторые симметричные шатуны, каждый из которых соединен с симметрично расположенным первым шатуном и посредством рычага соединен с кривошипом. Так получен кривошипно-ползунный механизм с прямолинейным движением концевых точек шатунов и постоянной длиной контура [1].

Впервые в теории механизмов и машин кривошипно-ползунный прямолинейно-направляющий механизм дополняется вторым свойством — постоянством длины контура механизма независимо от изменения его конфигурации при повороте кривошипа на некоторый угол ф.

Структурная схема механизма представлена на рис. 1 в двух положениях кривошипа:  $\varphi = 15^{\circ}$  и  $\varphi = 75^{\circ}$ . Механизм имеет стойку A, кривошип AB, шатун CD, равный двум длинам кривошипа и соединенный одним концом шарниром D с ползуном, а серединой соединенный шарниром B с кривошипом.

Добавленный правый второй шатун LF' соединен шарниром F' с левым первым шатуном C'D, а шарниром N посредством рычага NM' — с кривошипом AB' и образует с вертикалью от шарнира F' угол  $\alpha$ . Аналогично соединяется левый второй шатун L'F.

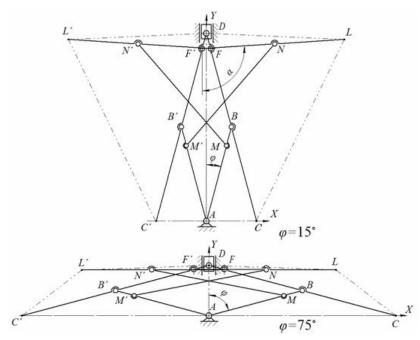


Рис. 1. Механизм с постоянной длиной контура в двух положениях кривошипа:  $\phi = 15^{\circ}$  и  $\phi = 75^{\circ}$ 

При повороте кривошипа AB на угол  $\phi$  ползун с шарниром D перемещается в направляющей по оси Y, а концевые точки C и C' шатунов CD и C'D движутся прямолинейно и разнонаправленно по оси X. При этом изменяется конфигурация контура механизма по точкам A, C, L, D, L', C', A и длина каждого симметричного участка AC, CL и LD.

Для доказательства свойства постоянства длины l контура механизма принимаем в безразмерной форме, т. е. в долях кривошипа AB, длину симметричных звеньев AM = a, LF = b, MN = c, NF = d, расстояние между шарнирами D и F равным DF = f, а длину звеньев AB = BC = BD = 1.

Значения a, b, c, d, f являются выходными параметрами механизма.

Постоянство длины контура механизма по точкам A, C, L, D, L', C', A обеспечивается, если в заданном диапазоне угла  $\phi$  поворота кривошипа AB выполняется основное условие синтеза  $l={\rm const.}$  Длина контура определяется удвоенной суммой длин симметричных участков AC, CL и LD.

$$l = AC + CL + LD = const, (1)$$

или

$$l = 2\sin\varphi + \sqrt{\left(b\sin\alpha - f\sin\varphi\right)^2 + \left[\left(2 - f\right)\cos\varphi - b\cos\alpha\right]^2} + \sqrt{\left(b\sin\alpha - f\sin\varphi\right)^2 + \left(f\cos\varphi + b\cos\alpha\right)^2} = \text{const},$$
(2)

где значение угла  $\alpha$  между вторым шатуном LF' и вертикалью к шарниру F' определяется зависимостью

$$\alpha = \arccos \frac{(a-f)^2 \sin^2 \varphi + (2-a-f)^2 \cos^2 \varphi + d^2 - c^2}{2d\sqrt{(a-f)^2 \sin^2 \varphi + (2-a-f)^2 \cos^2 \varphi}} - \frac{(2-a-f)\cos \varphi}{2d\sqrt{(a-f)^2 \sin^2 \varphi + (2-a-f)^2 \cos^2 \varphi}}.$$
(3)

Условию (1), (2) удовлетворяют только определенные значения параметров механизма a, b, c, d, f. Эти параметры при геометрическом синтезе механизма представляются параметрами синтеза, а постоянство длины l контура механизма является основным условием синтеза (2), которое выражается в виде целевой функции, отражающей изменение длины контура  $\Delta l$  в диапазоне угла  $\phi$  поворота кривошипа.

$$\Delta l = (l_{\text{max}} - l_{\text{min}}) \to \xi, \tag{4}$$

где  $l_{\max}$ ,  $l_{\min}$  — соответственно максимальная и минимальная длины контура механизма, определяемые по (2) в диапазоне угла поворота кривошипа AB;  $\xi$  — наименьшее, или допустимое, изменение длины l контура механизма.

Дополнительные условия синтеза выражаются ограничениями на параметры a, b, c, d, f в виде неравенств, устанавливающих допустимые для конструкции механизма области их существования:

$$a_1 \le a \ge a_2, b_1 \le b \ge b_2, c_1 \le c \ge c_2, d_1 \le d \ge d_2, f_1 \le f \ge f_2.$$
 (5)

Задача синтеза механизма сводится к поиску таких значений параметров a, b, c, d, f, при которых достигается основное условие синтеза (2), выполняются ограничения (5), а целевая функция (4) принимает наименьшее экстремальное значение в диапазоне угла поворота кривошипа  $\phi$ .

Процедура поиска a, b, c, d, f выполнялась по алгоритму метода золотого сечения [2] многомерной целевой функции (4). В исследованиях принималось практически значимое для этого механизма значение угла поворота кривошипа от начального  $\phi_1 = 15^{\circ}$  до конечного  $\phi_2 = 75^{\circ}$ .

В процессе поиска установлены следующие допустимые значения параметров механизма a,b,c,d,f, в пределах которых целевая функция (4) неразрывна и принимает свое экстремальное значение —  $0.78 \le a \ge 0.82$ ,  $1.45 \le b \ge 1.48$ ,  $1.37 \le c \ge 1.40$ ,  $0.74 \le d \ge 0.75$ ,  $0.16 \le f \ge 0.17$ .

Результаты синтеза представлены графиком (рис. 2), отражающим изменение длины контура механизма по синусоиде в диапазоне угла поворота кривошипа  $60^{\circ}$ . Из графика следует, что изменение длины l контура относительно своего среднего значения 8,0455 не превышает  $\Delta l = \pm 0,004$  %. Весьма незначительное изменение длины контура механизма позволяет утверждать о практически постоянной его длине в диапазоне принятого угла поворота кривошипа.

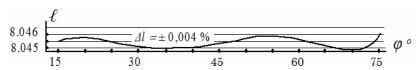


Рис. 2. Изменение длины контура механизма в пределах  $\phi = 15...75^{\circ}$ 

Bыводы. Получен прямолинейно-направляющий механизм с дополнительным свойством постоянства длины его контура, что повышает функциональные возможности и расширяет область применения. Механизм может служить в устройствах остовом регулируемой конструкции, несущим рабочие органы на гибком, например цепном, тяговом звене, охватывающем контур остова с переменной конфигурацией и постоянной длиной. Прямолинейное перемещение концевых точек C и C' шатунов и изменяемая в три и более раза длина участка C'C при постоянной длине всего контура позволяют использовать участок C'C контура механизма для изменения ширины захвата рабочего органа на гибком тяговом звене.

В конструкции остова ковшового устройства для очистки каналов с плоским дном [3] использован прямолинейно-направляющий механизм с постоянной длиной контура. Остов устройства регулируемой конструкции позволяет быстро изменять технологическую настройку ширины захвата рабочего органа в три и более раза практически без компенсаторов длины цепного тягового звена с закрепленными на нем ковшами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Симметричный кривошипно-ползунный механизм : а.с. № 1566126 СССР. / В. И. Богданов, В. В. Богданов // Бюллетень изобретений. 1990. № 19. С. 170.
- 2. *Иванов В. В.* Методы вычислений на ЭВМ : справочное пособие. Киев : Наукова думка, 1986. 584 с.
- 3. Устройство для очистки каналов : а.с. № 1328445 СССР / В. И. Богданов, В. В. Богданов // Бюллетень изобретений. 1987. № 29. С. 131.
- 1. Simmetrichnyy krivoshipno-polzunnyy mekhanizm : a.s.  $N_2$  1566126 SSSR. / V. I. Bogdanov, V. V. Bogdanov // Byulleten' izobreteniy. 1990.  $N_2$  19. S. 170.
- $2.\ \textit{Ivanov V. V.}$  Metody vychisleniy na EVM : spravochnoe posobie. Kiev : Naukova dumka, 1986. 584 s.
- 3. Ustroystvo dlya ochistki kanalov : a.s. N<br/>º 1328445 SSSR / V. I. Bogdanov, V. V. Bogdanov // Byulleten' izobreteniy. 1987. N<br/>º 29. S. 131.

© Богданов В. И., 2014

Поступила в редакцию в январе 2014 г.

# Ссылка для цитирования:

*Богданов В. И.* Синтез механизмов для устройств с остовом регулируемой конструкции // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 100—103.

УДК 624.04:539.3:519.3

# А. В. Игнатьев, Е. В. Онищенко

# РАСЧЕТ НЕРАСТЯЖИМОЙ ПРЕДНАПРЯЖЕННОЙ КОНТРГРУЗОМ НИТИ ПО МЕТОДУ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ФОРМЕ КЛАССИЧЕСКОГО СМЕШАННОГО МЕТОДА

Описан разработанный авторами алгоритм расчета нерастяжимой преднапряженной контргрузом нити, реализующий метод конечных элементов в классической форме смешанного метода. Приведен пример расчета.

K л ю ч е в ы е с л о в а: метод конечных элементов, смешанная форма, нитевые системы, преднапряжение контргрузом.

The algorithm of calculation of the inextensible thread prestrained by counterweight developed by the authors, which realizes the finite element method in a classical form of mixed method, is described. The example of calculation is given.

Key words: finite element method, mixed form, thread systems, pretension counterweight.

Рассмотрим нерастяжимую гибкую нить ( $EF = \infty$ , EJ = 0), растянутую подвешенным через блок на правом конце пролета AB грузом Q (рис. 1, a). Предположим, что к этой нити приложены узловые нагрузки  $P_i$ , под действием которых связанные с ними жестко узлы i получают смещения по вертикали и горизонтали  $\Delta x_i$ ,  $\Delta y_i$  (рис. 1,  $\delta$ ), а подвешенный напрягающий груз Q получает перемещение h [1].

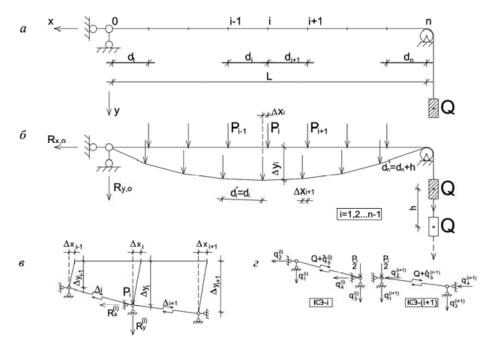


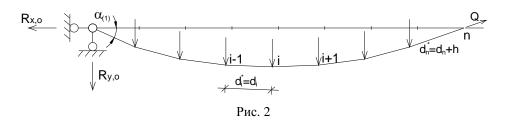
Рис. 1. Нерастяжимая нить, преднапряженная контргрузом: a — преднапряжение контргрузом;  $\delta$  — нить под нагрузкой;  $\epsilon$  — фрагмент основной системы;  $\epsilon$  — обозначения неизвестных:  $q_j^{(i)}$  — кинематические,  $\dot{q}_j^{(i)}$  — силовые

Фрагмент основной системы смешанного метода для рассматриваемой задачи показан на рис. 1,  $\epsilon$ . За неизвестные принимаются перемещения узлов  $\Delta x_i$ ,  $\Delta y_i$ , перемещение груза h и усилия в нити между узлами i-1, i (i=0...n).

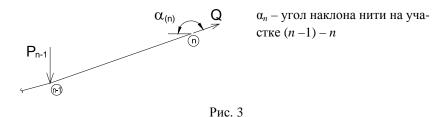
На рис. 1, z приведена конечно-элементная расчетная схема для данной задачи, на которой показан промежуточный узел i и примыкающие к нему конечные элементы.

*Постановка граничных условий*. Рассматриваемая система статически определимая (рис. 2).

(Нить отделена от опоры разрезом)



Усилие в нити на последнем (правом) участке равно Q (силе натяжения, создаваемой контргрузом Q) (рис. 3). Длина этого участка после нагружения будет равна  $d_n + h$ , то есть увеличивается по сравнению с исходным стоянием на величину подъема груза h.



Из условия равновесия системы следует:

$$R_{y,0} = Q\cos\alpha_n,$$

$$R_{y,0} = Q\sin\alpha_n - \sum_{i=1}^{n-1} P_i.$$
(1)

Из рассмотрения КЭ-1 получаем (рис. 4):

или

$$Q\cos\alpha_n - Q\cos\alpha_1 - \dot{q}_5^{(1)}\cos\alpha_1 = 0$$

т. е.

$$\dot{q}_{5}^{(1)} = \frac{Q\cos\alpha_{n} - Q\cos\alpha_{1}}{\cos\alpha_{1}} = Q\left(\frac{\cos\alpha_{n}}{\cos\alpha_{1}} - 1\right). \tag{2}$$

Из рис. 3 видно, что на участке (n-1)-n усилие растяжения равно Q, то есть

$$Q + \dot{q}_5^{(n)} = Q; \quad \dot{q}_5^{(n)} = 0.$$

Из геометрии системы (см. рис. 1, 6):

$$\sin \alpha_i = \frac{\Delta y_i - \Delta y_{i-1}}{d_i}, \cos \alpha_i = \frac{d_i + (\Delta x_{i-1} - \Delta x_i)}{d_i}.$$
 (3)

Общий алгоритм формирования матрицы откликов изложен в работе [2]. Для i-го KЭ элементы матрицы откликов определяются следующими выражениями:

$$\begin{split} \dot{r}_{1,5}^{(i)} &= -\dot{\delta}_{5,1}^{(i)} = -\sin\alpha_i; \ \dot{r}_{2,5}^{(i)} = -\dot{\delta}_{5,2}^{(i)} = \cos\alpha_i; \\ \dot{r}_{3,5}^{(i)} &= -\dot{\delta}_{5,3}^{(i)} = \sin\alpha_i; \ \dot{r}_{4,5}^{(i)} = -\dot{\delta}_{5,4}^{(i)} = -\cos\alpha_i; \\ r_{1,P}^{(i)} &= -\frac{1}{2}P_{i-1} - Q\sin\alpha_i; \ r_{2,P}^{(i)} = Q\cos\alpha_i; \\ r_{3,P}^{(i)} &= -\frac{1}{2}P_i + Q\sin\alpha_i; \ r_{4,P}^{(i)} = -Q\cos\alpha_i. \end{split}$$

Уравнения смешанного метода имеют в данной задаче следующий физический смысл (рис. 5):

$$R_x^{(1)}=0,\ R_y^{(1)}=0,\ \Delta_5^{(1)}=0$$
— для узла 1 и КЭ-1 соответственно;

·····;

$$R_x^{(i)}=0,\ R_y^{(i)}=0,\ \Delta_5^{(i)}=0$$
 — для узла  $i$  и КЭ- $i$  соответственно; . (5)

 $R_{_{_{X}}}^{(n-1)}=0,\ R_{_{_{V}}}^{(n-1)}=0,\ \Delta_{_{5}}^{(n-1)}=0$ — для узла (n-1) и КЭ-(n-1) соответственно;

 $\Delta_5^{(n)}=0$  — для узла n и КЭ-n соответственно.

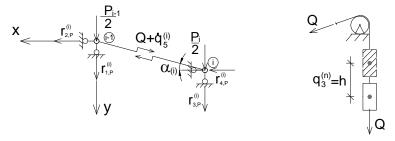


Рис. 5

(6)

Таким образом, уравнения получаются объединением КЭ, примыкающих к общему для них узлу.

Запишем уравнения в развернутом виде:

Для КЭ-1:

$$R_x^{(1)} = \dot{r}_{4,5}^{(1)} q_5^{(1)} + \dot{r}_{2,5}^{(2)} q_5^{(2)} + r_{4,P}^{(1)} + r_{2,P}^{(2)} = 0;$$

$$R_{y}^{(1)}=\dot{r}_{3,5}^{(1)}q_{5}^{(1)}+\dot{r}_{1,5}^{(2)}q_{5}^{(2)}+r_{3,P}^{(1)}+r_{1,P}^{(2)}=0;$$

$$\Delta_5^{(1)} = \dot{\delta}_{5,3}^{(1)} q_3^{(1)} + \dot{\delta}_{5,4}^{(1)} q_4^{(1)} = 0.$$

Для i-го КЭ (i = 2, 3, ..., n - 1):

$$\begin{split} R_x^{(i)} &= \dot{r}_{4,5}^{(i)} q_5^{(i)} + \dot{r}_{2,5}^{(i+1)} q_5^{(i+1)} + r_{4,P}^{(i)} + r_{2,P}^{(i+1)} = 0; \\ R_y^{(i)} &= \dot{r}_{3,5}^{(i)} q_5^{(i)} + \dot{r}_{1,5}^{(i+1)} q_5^{(i+1)} + r_{3,P}^{(i)} + r_{1,P}^{(i+1)} = 0; \end{split}$$

$$\Delta_5^{(i)} = \dot{\delta}_{5,1}^{(i)} q_1^{(i)} + \dot{\delta}_{5,2}^{(i)} q_2^{(i)} + \dot{\delta}_{5,3}^{(i)} q_3^{(i)} + \dot{\delta}_{5,4}^{(i)} q_4^{(i)} = 0.$$

Для (n-1)-го КЭ:

$$R_x^{(n-1)} = \dot{r}_{4,5}^{(n-1)} q_5^{(n-1)} + \dot{r}_{2,5}^{(n)} q_5^{(n)} + r_{4,P}^{(n-1)} + r_{2,P}^{(n)} = 0;$$

$$R_{y}^{(n-1)} = \dot{r}_{3,5}^{(n-1)} q_{5}^{(n-1)} + \dot{r}_{1,5}^{(n)} q_{5}^{(n)} + r_{3,P}^{(n-1)} + r_{1,P}^{(n)} = 0;$$

$$\Delta_5^{(n-1)} = \dot{\delta}_{5,1}^{(n-1)} q_1^{(n-1)} + \dot{\delta}_{5,2}^{(n-1)} q_2^{(n-1)} + \dot{\delta}_{5,3}^{(n-1)} q_3^{(n-1)} + \dot{\delta}_{5,4}^{(n-1)} q_4^{(n-1)} = 0.$$

Для n-го KЭ:

$$\Delta_5^{(n)} = \dot{\delta}_{5,1}^{(n)} q_1^{(n)} + \dot{\delta}_{5,2}^{(n)} q_2^{(n)} + \dot{\delta}_{5,3}^{(n)} q_3^{(n)} = 0;$$

$$q_3^{(n)} = h; \dot{\delta}_{5,3}^{(n)} = 1.$$

Система нелинейных уравнений решается с учетом сформулированных выше граничных условий:

$$\dot{q}_{5}^{(1)} = Q \left( \frac{\cos \alpha_{n}}{\cos \alpha_{1}} - 1 \right); \ \dot{q}_{5}^{(n)} = 0; \ \dot{q}_{3}^{(n)} = h; \ d_{n}^{*} = d_{n} + h.$$
 (7)

Для иллюстрации алгоритма расчета и тестирования результатов рассмотрим случай, когда сосредоточенная нагрузка приложена только в середине пролета (рис. 6, a).

Основная система изображена на рис. 6, *б*. Для четырех неизвестных в основной системе имеем четыре разрешающих уравнения:

$$R_{x}^{(1)} = \dot{r}_{4,5}^{(1)} q_{5}^{(1)} + \dot{r}_{2,5}^{(2)} q_{5}^{(2)} + r_{4,P}^{(1)} + r_{2,P}^{(2)} = 0;$$

$$R_{y}^{(1)} = \dot{r}_{3,5}^{(1)} q_{5}^{(1)} + \dot{r}_{1,5}^{(2)} q_{5}^{(2)} + r_{3,P}^{(1)} + r_{1,P}^{(2)} = 0;$$

$$\Delta_{5}^{(1)} = \dot{\delta}_{5,3}^{(1)} q_{3}^{(1)} + \dot{\delta}_{5,4}^{(1)} q_{4}^{(1)} = 0;$$

$$\Delta_{5}^{(2)} = \dot{\delta}_{5,1}^{(2)} q_{1}^{(2)} + \dot{\delta}_{5,2}^{(2)} q_{2}^{(2)} + \dot{\delta}_{5,3}^{(2)} q_{3}^{(2)} = 0.$$
(8)

Здесь:

$$\begin{split} \dot{r}_{4,5}^{(1)} &= -\dot{\delta}_{5,4}^{(1)} = -\cos\alpha_{(1)}; \quad \dot{r}_{2,5}^{(2)} = -\dot{\delta}_{5,2}^{(2)} = \cos\alpha_{(2)}; \\ \dot{r}_{3,5}^{(1)} &= -\dot{\delta}_{5,3}^{(1)} = \sin\alpha_{(1)}; \quad \dot{r}_{1,5}^{(2)} = -\dot{\delta}_{5,1}^{(2)} = \sin\alpha_{(2)}; \\ \dot{\delta}_{5,3}^{(2)} &= 1; \quad r_{4,P}^{(1)} = -Q\cos\alpha_{(1)}; \quad r_{2,P}^{(2)} = Q\cos\alpha_{(2)}; \\ r_{3,P}^{(1)} &= -\frac{P_1}{2} + Q\sin\alpha_{(1)}; \quad r_{1,P}^{(2)} = -\frac{P_1}{2} + Q\sin\alpha_{(2)}; \\ \sin\alpha_{(1)} &= \frac{q_3^{(1)}}{d_1}; \quad \sin\alpha_{(2)} = \frac{q_3^{(1)}}{d_2 + q_3^{(2)}}; \\ \cos\alpha_{(1)} &= \frac{d_1 - q_4^{(1)}}{d_1}; \quad \cos\alpha_{(2)} = \frac{d_2 + q_4^{(1)}}{d_2 + q_3^{(2)}}. \end{split}$$

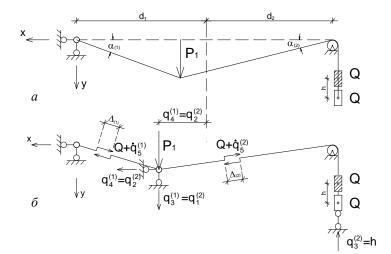


Рис. 6

После подстановки зависимостей (9) в систему уравнений (8) получаем систему четырех нелинейных алгебраических уравнений относительно неизвестных  $q_3^{(1)},\ q_4^{(1)},\ \dot{q}_5^{(1)},\ q_3^{(2)}$  (с учетом того, что  $q_4^{(1)}=q_2^{(2)};\ q_3^{(1)}=q_1^{(2)};\ \dot{q}_5^{(2)}=0;\ q_3^{(2)}=h$ ):

$$\begin{split} R_{x}^{(1)} &= -\frac{d_{1} - q_{4}^{(1)}}{d_{1}} q_{5}^{(1)} + Q \left( \frac{d_{2} + q_{4}^{(1)}}{d_{2} + q_{3}^{(2)}} - \frac{d_{1} - q_{4}^{(1)}}{d_{1}} \right) = 0; \\ R_{y}^{(1)} &= \frac{q_{3}^{(1)}}{d_{1}} q_{5}^{(1)} - P + Q \left( \frac{q_{3}^{(1)}}{d_{1}} + \frac{q_{3}^{(1)}}{d_{2} + q_{3}^{(2)}} \right) = 0; \\ \Delta_{5}^{(1)} &= -\frac{q_{3}^{(1)}}{d_{1}} q_{3}^{(1)} + \frac{d_{1} - q_{4}^{(1)}}{d_{1}} q_{4}^{(1)} = 0; \\ \Delta_{5}^{(2)} &= -\frac{q_{3}^{(1)}}{d_{2} + q_{3}^{(2)}} q_{3}^{(1)} - \frac{d_{2} + q_{4}^{(1)}}{d_{2} + q_{3}^{(2)}} q_{4}^{(1)} + q_{3}^{(2)} = 0. \end{split}$$

$$(10)$$

Численное решение системы при  $d_1=5$  м;  $d_2=5$  м; Q=10 т;  $EF=\infty$ ;  $\frac{P_1}{Q}=0...15$  выполнено методом последовательного догружения с уточнением

на каждом шаге догружения результатов с помощью метода Ньютона.

Результат решения задачи методом конечных элементов в форме классического смешанного метода представлен на рис. 7.

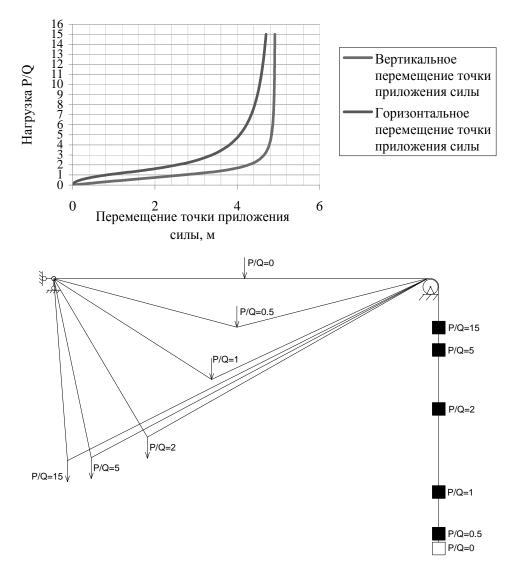


Рис. 7. Деформация системы при условии нерастяжимости нити

Для оценки сходимости решения к точному выполним сравнение численного решения с аналитическим.

Зададимся углом наклона левого элемента в 30°. С учетом того, что нить нерастяжима, вертикальное перемещение точки приложения силы

$$q_3^{(1)} = d_1 \sin 30^\circ = 5 \cdot 0, 5 = 2,5 \text{ M}.$$

Горизонтальное перемещение точки приложения силы

$$q_4^{(1)} = d_1(1 - \cos 30^\circ) = 5(1 - 0.866) = 0.6699 \text{ m}.$$

Перемещение контргруза составит

$$q_3^{(2)} = \sqrt{\left(d_2 + q_4^{(1)}\right)^2 + q_3^{(1)^2}} - d_2 = \sqrt{\left(5 + 0,6699\right)^2 + 2,5^2} - 5 = 1,1966 \text{ m}.$$

Угол наклона правого элемента:

$$\sin \alpha_{(2)} = \frac{q_3^{(1)}}{d_2 + q_3^{(2)}} = \frac{2.5}{5 + 1.1966} = 0.4034.$$

$$\cos \alpha_{(2)} = \frac{d_2 + q_4^{(1)}}{d_2 + q_3^{(2)}} = \frac{5 + 0,6699}{5 + 1,1966} = 0,9150.$$

Рассмотрим равновесие первого узла (левого):

$$(q_5^{(1)} + Q)\cos\alpha_{(1)} = Q\cos\alpha_{(2)}, \ q_5^{(1)}\cos\alpha_{(1)} + Q\cos\alpha_{(1)} = Q\cos\alpha_{(2)},$$

$$q_{5}^{(1)} = Q \frac{\cos \alpha_{(2)}}{\cos \alpha_{(1)}} - Q, \ P = (q_{5}^{(1)} + Q) \sin \alpha_{(1)} + Q \sin \alpha_{(2)},$$

$$P = \left( Q \frac{\cos \alpha_{(2)}}{\cos \alpha_{(1)}} - Q + Q \right) \sin \alpha_{(1)} + Q \sin \alpha_{(2)},$$

$$P = Q \cos \alpha_{(2)} \tan \alpha_{(1)} + Q \sin \alpha_{(2)}, \ \frac{P}{Q} = \cos \alpha_{(2)} \tan \alpha_{(1)} + \sin \alpha_{(2)}.$$

После подстановки значений тригонометрических функций при заданном  $\alpha$  получаем

$$\frac{P}{Q} = \cos \alpha_{(2)} \tan \alpha_{(1)} + \sin \alpha_{(2)} = 0.9150 \tan 30^{\circ} + 0.4034 = 0.9317.$$

При соотношении  $\frac{P}{Q} = 0.9317$  при расчете системы методом конечных

элементов с шагом догружения  $\frac{P}{O} = 0.05$ 

$$q_3^{(1)} = 2,49916 \text{ m}; \ q_4^{(1)} = 0,712074 \text{ m}; \ q_3^{(2)} = 1,255625 \text{ m}.$$

Относительная погрешность составляет:

$$\Delta q_3^{(1)} = \frac{2,5-2,49916}{2.5}100 = 0,0336 \%;$$

$$\Delta q_4^{(1)} = \frac{0,6699 - 0,712074}{0,6699} 100 = 6,29 \text{ %};$$

$$\Delta q_3^{(2)} = \frac{1,1966 - 1,255625}{1,1966} 100 = 4,93 \%.$$

Так как относительная погрешность при вычислении одного из неизвестных превышает 5 %, учащаем шаг нагружения в 2 раза.

При соотношении P/Q = 0.9317 при расчете системы методом конечных элементов с шагом нагружения P/Q = 0.025

$$q_3^{(1)} = 2,499757 \text{ m}; \ q_4^{(1)} = 0,699661 \text{ m}; \ q_3^{(2)} = 1,239058 \text{ m}.$$

Относительная погрешность составляет:

$$\Delta q_3^{(1)} = \frac{2,5 - 2,499757}{2,5} 100 = 0,00972 \%.$$

$$\Delta q_4^{(1)} = \frac{0,6699 - 0,699661}{0,6699} 100 = 4,44 \%.$$

$$\Delta q_3^{(2)} = \frac{1,1966 - 1,239058}{1,1966} 100 = 3,55 \%.$$

Проведенные расчеты тестовой системы показывают эффективность смешанной формы МКЭ. Точность решения зависит от шага нагружения. Решение данной задачи по традиционному МКЭ в перемещениях невозможно в принципе.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Рекач В. Г.* Руководство к решению задач прикладной теории упругости. М. : Высш. шк., 1973, 384 с.
- 2. Игнатьев В. А., Игнатьев А. В., Жиделев А. В. Смешанная форма метода конечных элементов в задачах строительной механики. Волгоград, 2006. 172 с.
- 1. Rekach V. G. Rukovodstvo k resheniyu zadach prikladnoy teorii uprugosti. M.: Vyssh. shk., 1973. 384 s.
- 2. *Ignat'ev V. A., Ignat'ev A. V., Zhidelev A. V.* Smeshannaya forma metoda konechnykh elementov v zadachakh stroitel'noy mekhaniki. Volgograd, 2006. 172 s.

© Игнатьев А. В., Онищенко Е. В., 2014

Поступила в редакцию в апреле 2014 г.

## Ссылка для цитирования:

*Игнатьев А. В., Онищенко Е. В.* Расчет нерастяжимой преднапряженной контргрузом нити по методу конечных элементов в форме классического смешанного метода // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 104—111.

УДК 624.072.2:539.214

### А. В. Старов

# ДИНАМИКА ПЛАСТИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С УЧЕТОМ УПРОЧНЕНИЯ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К СКОРОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Рассмотрена постановка задач пластического деформирования идеально пластических пологих оболочек вращения под действием ударной нагрузки большой интенсивности с учетом больших прогибов, упрочнения материала и зависимости предела текучести от скорости деформирования. Получена полная система разрешающих уравнений, предложен алгоритм численной реализации задачи на основе дифференциально-разностного метода.

Ключевые слова: пологие оболочки вращения, пластическое деформирование, ударные нагрузки, физически и геометрически нелинейные задачи.

Statement of problems of a plastic deformation of ideally plastic shallow roller shells under the influence of an impact load of big intensity, taking into account bigger slags, hardening of the material and dependence of a yield stress on the speed of deformation, is observed. The full system of resolving equations is gained, the algorithm of numerical implementation of a problem on the basis of the difference method is offered.

 $K\ e\ y\ w\ o\ r\ d\ s$ : shallow roller shells, plastic deformation, impact loads, physically and geometrically nonlinear problems.

Актуальной задачей динамической теории предельного сопротивления [1] является исследование динамического поведения круглых пластинок и пологих оболочек вращения при действии кратковременных нагрузок большой интенсивности, значительно превышающих несущую способность конструкции. Вследствие появления больших пластических деформаций возникает необходимость учета физической и геометрической нелинейностей.

Решение подобных задач на основе дискретных моделей (МКЭ, МКР и т. д.) в упруго-вязко-пластической постановке с учетом инерции вращения, волновых эффектов, упрочнения, зависимости предела текучести материала от скорости деформирования и других факторов связано с достаточно сложным алгоритмом численной реализации. При этом возникает необходимость оценки сходимости результатов к точному решению [2—3]. Для устойчивости разностной схемы приходится вводить искусственную вязкость, использовать другие приемы, что искажает результаты и не гарантирует сходимости.

Использование подобных алгоритмов необходимо в научных исследованиях при изучении процесса распространения упругопластических волн, а в расчетной практике вряд ли возможно. Целью данной статьи является разработка обоснованно упрощенной методики решения динамических задач с учетом физической и геометрической нелинейностей, упрочнения и чувствительности материала к скорости деформирования. В этом случае целесообразно использование модели жесткопластического тела, пренебрегающей упругими деформациями, при условии, что пластические деформации на порядок превышают упругие [3].

Постановка задачи динамического воздействия нагрузками большой интенсивности на пологие оболочки вращения с учетом больших прогибов на основе нелинейного условия пластичности представлена в [4]. В начальный момент времени к оболочке мгновенно прикладывается внутреннее давление,

начальное значение которого превышает несущую способность оболочки. В зависимости от интенсивности, длительности и формы импульса деформирование оболочки может состоять из фазы нагружения и фазы затухания движения. Целью является исследование напряженно-деформированного состояния в каждый момент времени, определение остаточных пластических деформаций срединной поверхности.

Уравнения движения пологой оболочки с учетом инерции вращения имеют вид

$$\beta \frac{\partial^{2} u}{\partial t^{2}} = \frac{1}{\rho} \left[ n_{2} - \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho n_{1} \cos \varphi - \rho Q \sin \varphi) \right], \ \beta = \frac{h^{2}}{4\rho_{0}^{2}},$$

$$\rho Q \cos^{-1} \varphi = m_{2} - \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho m_{1}) - \frac{8}{3} \beta \frac{\partial^{3} w}{\partial x \partial t^{2}},$$

$$\frac{\partial^{2} w}{\partial t^{2}} = P(\rho, t) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho n_{1} \sin \varphi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho Q \cos \varphi),$$

$$\sin \varphi = \frac{\partial w}{\partial \rho} \left[ 1 + \beta \left( \frac{\partial w}{\partial \rho} + \frac{\partial f}{\partial \rho} \right)^{2} \right]^{-\frac{1}{2}}, \cos \varphi = \left[ 1 + \beta \left( \frac{\partial w}{\partial \rho} + \frac{\partial f}{\partial \rho} \right)^{2} \right]^{-\frac{1}{2}},$$

$$(1)$$

где используются безразмерные координаты и переменные:  $w=2\overline{w}/h$ ,  $u=4\overline{u}\rho_0/h^2$  — прогиб и перемещение срединной поверхности в радиальном направлении;  $\rho=\overline{\rho}/\rho_0$  — радиус проекции произвольной точки;  $\rho_0$  — радиус проекции точки на опорном контуре оболочки;  $n_i=\overline{N}_i/2\sigma_s h$ ,  $m_i=\overline{M}_i/\sigma_s h^2$  — компоненты мембранных и изгибных силовых факторов;  $P=\overline{P}\rho_0^2/\sigma_s h^2$  — действующее внутреннее давление;  $f=f(\rho)$  — уравнение срединной поверхности в безразмерных координатах; 2h — толщина оболочки; i=1,2 — индексы радиального и окружного направлений;  $t=t\sqrt{2\sigma_s h/\gamma\rho_0^2}$  — безразмерное время;  $\gamma$  — масса объема оболочки на единицу площади срединной поверхности;  $\sigma_s=\sigma_s^0\Phi\left(\epsilon_{i,}\dot{\epsilon}_i\right)$  — динамический предел текучести материала, принимаемый зависимым от интенсивности деформаций и скорости пластического деформирования.

Граничные условия формулируются в зависимости от типа опирания. Шарнирно-неподвижный край:

$$m_1(0,t) = m_2(0,t), \ Q(0,t) = 0, \ \frac{\partial w}{\partial \rho}(0,t) = 0, \ m_1(1,t) = 0, \ w(1,t) = 0, \ u(1,t) = 0.$$

Жесткая заделка:

$$m_1(0,t) = m_2(0,t), \ Q(0,t) = 0, \ \frac{\partial w}{\partial \rho}(0,t) = 0, \ m_1(1,t) = -m, \ w(1,t) = u(1,t) = 0.$$

Начальные условия:

$$w(\rho,0) = \dot{w}(\rho,0) = 0, \ u(\rho,0) = \dot{u}(\rho,0) = 0.$$

Функция 
$$\Phi\left(\varepsilon_{i,\dot{\varepsilon}_{i}}\right)$$
 принимается в виде  $\Phi\left(\varepsilon_{i,\dot{\varepsilon}_{i}}\right) = 1 + \frac{E^{k}}{\sigma_{s}^{0}} \varepsilon_{i} + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{i}}{\varepsilon_{0}}\right)^{n}$ , где

 $E^k$  — касательный модуль упрочнения,  $\varepsilon_0$ , n — константы, определяемые на основе экспериментальных испытаний с высокими скоростями деформирования при одноосном напряженном состоянии [5, 6].

Интенсивность деформаций по толщине оболочки:

$$\varepsilon_{i} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{P_{\varepsilon} + 2zP_{\varepsilon\chi} + z^{2}P_{\chi}}, \quad P_{\varepsilon} = \varepsilon_{1}^{2} + \varepsilon_{1}\varepsilon_{2} + \varepsilon_{2}^{2}, 
P_{\chi} = \chi_{1}^{2} + \chi_{1}\chi_{2} + \chi_{2}^{2}, \quad 2P_{\varepsilon\chi} = 2\varepsilon_{1}\chi_{1} + 2\varepsilon_{2}\chi_{2} + \varepsilon_{1}\chi_{2} + \varepsilon_{2}\chi_{1}.$$
(2)

Выполняя интегрирование по толщине оболочки, на основании неравенства Буняковского получим усредненные значения интенсивности деформаций по координате z:

$$\varepsilon_{i,0}^{z} = \frac{1}{2h} \int_{-h}^{h} \varepsilon_{i} dz = \frac{1}{2h} \int_{-h}^{h} \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{P_{\varepsilon} + 2zP_{\varepsilon\chi} + z^{2}P_{\chi}} dz = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{P_{\varepsilon} + \frac{h^{2}}{3}P_{\chi}} . \tag{3}$$

Выполняя интегрирование по площади оболочки, получим усредненное значение интенсивности деформаций по объему, которая будет использоваться для определения функции  $\Phi(\varepsilon_i \dot{\varepsilon}_i)$ :

$$\varepsilon_{i,0} = \varepsilon_{i,0}^{z,\rho} = \frac{2}{\rho_0^2} \frac{2}{\sqrt{3}} \int_0^{\rho_0} \sqrt{P_{\varepsilon} + \frac{h^2}{3} P_{\chi}} \rho d\rho.$$
 (4)

Средняя скорость интенсивности деформаций  $\dot{\varepsilon}_{i,0} = \varepsilon_{i,0} / t_k$ , где  $t = t_k$  — время пластического деформирования.

Выражения для деформаций и изменения кривизны срединной поверхности имеют вид

$$\overline{\varepsilon}_{1} = \frac{h^{2}}{4\rho_{0}^{2}} \left( \frac{\partial u}{\partial \rho} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial \rho} \right)^{2} - w \frac{\partial f^{2}}{\partial \rho^{2}} \right), \quad \overline{\varepsilon}_{2} = \frac{h^{2}}{4\rho_{0}^{2}} \left( \frac{u}{\rho} - w \frac{1}{\rho} \frac{\partial f}{\partial \rho} \right),$$

$$\overline{\chi}_{1} = -\frac{h}{2\rho_{0}^{2}} \frac{\partial^{2} w}{\partial \rho^{2}}, \qquad \overline{\chi}_{2} = -\frac{h}{2\rho_{0}^{2}} \frac{1}{\rho} \frac{\partial w}{\partial \rho}.$$
(5)

Учет взаимовлияния мембранных и изгибных силовых факторов осуществляется с помощью поверхности текучести [3]:

$$n_1^2 - n_1 n_2 + n_2^2 + m_1^2 - m_1 m_2 + m_2^2 = \Phi(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i).$$
 (6)

Для определения поля перемещений используется ассоциированный закон течения, согласно которому вектор скорости пластической деформации ортогонален к поверхности текучести. Мощность диссипации энергии в безразмерном виде

$$D = \int_{0}^{1} \left( \dot{\varepsilon}_{1} n_{1} + \dot{\varepsilon}_{2} n_{2} + \dot{\chi}_{1} m_{1} + \dot{\chi}_{2} m_{2} \right) \rho d\rho + \left\| \frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho} m_{1} \right\|_{\rho=1}, \tag{7}$$

где 
$$D = \frac{2\bar{D}}{\sigma_s h^3}$$
,  $\varepsilon_i = \frac{4\dot{\varepsilon}_i \rho_0^2}{h^2}$ ,  $\dot{\chi}_i = \frac{2\dot{\chi}_i \rho_0^2}{h}$  — безразмерные скорость диссипации,

скорости деформаций и скорости измерения кривизны срединной поверхности соответственно, квадратные скобки — разрыв в скорости наклона срединной поверхности при  $\rho = 1$ .

Гиперповерхность текучести (6) заменим тремя эквивалентными соотношениями

$$m_1^2 - m_1 m_2 + m_2^2 = m^2, \ n_1^2 - n_1 n_2 + n_2^2 = n^2, \ m^2 + n^2 = \Phi(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i).$$
 (8)

Принимая в качестве пластического потенциала поверхность текучести (8) и составляя условие максимума удельной мощности диссипации энергии, на основании ассоциированного закона течения получим

$$m_{1} = \frac{m(2\dot{\chi}_{1} + \dot{\chi}_{2})}{\sqrt{3(\dot{\chi}_{1}^{2} + \dot{\chi}_{1}\dot{\chi}_{2} + \dot{\chi}_{2}^{2})}}, \quad m_{2} = \frac{m(2\dot{\chi}_{2} + \dot{\chi}_{1})}{\sqrt{3(\dot{\chi}_{1}^{2} + \dot{\chi}_{1}\dot{\chi}_{2} + \dot{\chi}_{2}^{2})}},$$

$$n_{1} = \frac{n(2\dot{\varepsilon}_{1} + \dot{\varepsilon}_{2})}{\sqrt{3(\dot{\varepsilon}_{1}^{2} + \dot{\varepsilon}_{1}\dot{\varepsilon}_{2} + \dot{\varepsilon}_{2}^{2})}}, \quad n_{2} = \frac{n(2\dot{\varepsilon}_{2} + \dot{\varepsilon}_{1})}{\sqrt{3(\dot{\varepsilon}_{1}^{2} + \dot{\varepsilon}_{1}\dot{\varepsilon}_{2} + \dot{\varepsilon}_{2}^{2})}}.$$

$$(9)$$

Последние соотношения можно представить так:

$$m_{1} = \frac{m(2\eta + 1)}{\sqrt{3(1 + \eta + \eta^{2})}}, \quad m_{2} = \frac{m(\eta + 2)}{\sqrt{3(1 + \eta + \eta^{2})}}, \quad \eta = \frac{\dot{\chi}_{1}}{\dot{\chi}_{2}},$$

$$n_{1} = \frac{n(2 + \upsilon)}{\sqrt{3(1 + \upsilon + \upsilon^{2})}}, \quad n_{2} = \frac{n(2\upsilon + 1)}{\sqrt{3(1 + \upsilon + \upsilon^{2})}}, \quad \upsilon = \frac{\dot{\varepsilon}_{2}}{\dot{\varepsilon}_{1}}.$$
(10)

Учет тангенциального ускорения и наличие в правой части системы (1) четвертых производных по пространственной координате от скорости прогиба требует на основании условия Куранта выполнения соотношения между шагами интегрирования по времени и по радиусу порядка  $\Delta t / \left(\Delta \rho\right)^4 < 1$ , что может оказаться неприемлемыми затратами машинного времени и не гарантирует точность и устойчивость решения.

Пренебрегая тангенциальным ускорением (радиальное перемещение на порядок меньше нормального к срединной поверхности) и полагая, что оболочка полога, а прогибы не превышают 2—3 толщин, получим систему уравнений

$$n_{2} - \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho n_{1}), \frac{\partial^{2} w}{\partial t^{2}} - \frac{8}{3} \beta \frac{\partial^{4} w}{\partial x^{2} \partial t^{2}} =$$

$$= P(\rho, t) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[ \rho n_{1} \left( \frac{\partial w}{\partial \rho} + \frac{\partial f}{\partial \rho} \right) \right] - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( m_{2} - \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho m_{1}) \right), \beta = \frac{h^{2}}{4\rho_{0}^{2}}.$$
(11)

Для определения мембранных усилий  $n_1$  и  $n_2$  необходимо знать поле скоростей радиальных перемещений. Подставляя соотношения (10) в первое уравнение системы (11), получим обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\frac{\upsilon d\upsilon}{\left(1+\upsilon+\upsilon^2\right)\left(\upsilon-1\right)} = -\frac{2d\rho}{3\rho},$$

которое имеет решение  $\upsilon \equiv 1$ .

Отсюда следует  $n_1 = n_2 = n$  и, соответственно,

$$\dot{u} = \beta \rho \int_{\rho}^{1} \left( \frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho} \frac{\partial w}{\partial \rho} + \frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho} \frac{\partial f}{\partial \rho} \right) \frac{d\rho}{\rho}, \quad \dot{\varepsilon}_{i} = \beta \int_{\rho}^{1} \left( \frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho} \frac{\partial w}{\partial \rho} + \frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho} \frac{\partial f}{\partial \rho} \right) \frac{d\rho}{\rho}. \tag{12}$$

Здесь точка — дифференцирование по времени или по любому неубывающему параметру нагружения.

Деформации в соответствии с (12)

$$\varepsilon_{i} = \varepsilon_{i}^{0} + \int_{0}^{t} \dot{\varepsilon}_{i} dt = \varepsilon_{i}^{0} + \beta \int_{\rho}^{1} \left( \frac{1}{2} \left( \frac{dw}{d\rho} \right)^{2} + \frac{\partial w}{\partial \rho} \frac{\partial f}{\partial \rho} \right) \frac{d\rho}{\rho}, \tag{13}$$

где  $\varepsilon_i^0$  — начальное поле деформаций, остающееся неопределенным вследствие применения модели жесткопластического тела.

Подставляя в (7) выражения для изгибающих моментов (9) и скоростей деформаций срединной поверхности (12), найдем

$$D = D^{m} + D^{n}, \quad D^{m} = \frac{2m}{\sqrt{3}} \int_{0}^{1} \sqrt{\dot{\chi}_{1}^{2} + \dot{\chi}_{1}\dot{\chi}_{2} + \dot{\chi}_{2}^{2}} \rho d\rho + \left[ \left[ \frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho} \right] \right] m_{1} \Big|_{\rho=1},$$

$$D^{n} = n \int_{0}^{1} \frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho} \frac{\partial w}{\partial \rho} \rho d\rho - n \int_{0}^{1} \left( \frac{\partial^{2} f}{\partial \rho^{2}} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial f}{\partial \rho} \right) \dot{w} \rho d\rho.$$
(14)

Условие максимума  $\frac{\partial D}{\partial n} = 0$  позволяет получить

$$\frac{n}{m} = \frac{\int_{0}^{1} \frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho} \frac{\partial w}{\partial \rho} \rho d\rho - \int_{0}^{1} \left( \frac{\partial^{2} f}{\partial \rho^{2}} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial f}{\partial \rho} \right) \dot{w} \rho d\rho}{\frac{2}{\sqrt{3}} \int_{0}^{1} \sqrt{\dot{\chi}_{1}^{2} + \dot{\chi}_{1} \dot{\chi}_{2} + \dot{\chi}_{2}^{2}} \rho d\rho + \left[ \frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho} \right] m_{1} \Big|_{\rho=1}}.$$
(15)

В условиях деформирования, близких к стоячей волне, при вычислении соответствующих функций и интегралов вектор скоростей перемещений можно заменить вектором перемещений, что значительно ослабляет требования к отношению шагов по времени и по пространственной координате.

Для решения системы дифференциальных уравнений в частных производных (11) целесообразно использовать дифференциально-разностный метод, сводя задачу к системе обыкновенных дифференциальных уравнений,

порядок которой зависит от степени дискретизации по пространственной координате. Полученная система уравнений может быть решена с использованием метода Рунге — Кутты, при этом начальные значения изгибающих моментов и мембранных усилий определяются типом опорного закрепления и характером внешней нагрузки.

Учет упрочнения материала и зависимость предела текучести от скорости деформирования осуществляется методом последовательных приближений путем усреднения интенсивности деформаций [5, 6] по объему оболочки.

Геометрические параметры и параметры нагрузки приводятся к безразмерному виду. Выполняется расчет, определяются остаточные прогибы и время деформирования. Далее они приводятся к размерному виду, определяются усредненные значения интенсивности деформаций и скорости интенсивности деформаций, на основании которых определяется функция  $\Phi(\varepsilon_i \dot{\varepsilon}_i)$  и, соответственно, динамический предел текучести материала.

Средняя скорость интенсивности деформаций может быть также определена через мощность диссипации энергии

$$\dot{\varepsilon}_{i,0} = \frac{h^2}{2\rho_0^2} D, \ \varepsilon_{i,0} = \frac{h^2}{2\rho_0^2} \int_0^t D \, dt \ . \tag{16}$$

После этого уточняется параметр нагрузки в безразмерном виде. Выполняется расчет, определяются новые значения остаточных прогибов и времени деформирования. Итерационный процесс быстро сходится, достаточно 3—4 итерации.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Ерхов М. И. Теория идеально пластических тел и конструкций М.: Наука, 1978. 352 с.
- 2. *Кошур В. Д., Немировский Ю. В.* Континуальные и дискретные модели динамического деформирования элементов конструкции. Новосибирск: Наука, 1990. 198 с.
- 3. *Баженов В. Г., Ломунов В. К., Осетров С. Л.* Исследование применимости жесткопластической модели в задачах импульсного деформирования упругопластических пластин при малых и больших прогибах // Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева. Механика предельного состояния. 2008. № 1. С. 64—69.
- 4. *Старов А. В.* Полная система уравнений динамического ударного нагружения жесткопластических пологих оболочек вращения с учетом больших прогибов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2011. № 4. С. 26—31.
- 5. Себекина В. И., Дьячков Г. Ф., Старов А. В. Оценка остаточных перемещений круглых плоских мембран при динамическом нагружении // Исследования по расчету строительных конструкций и надежности сооружений: сб. науч. тр. ЦНИИСК им. Кучеренко. М. : ЦНИИСК им. Кучеренко, 1987. С. 152—163.
- 6. *Perrone N*. On a simplified method of solving impulsively loaded structures of rate sensitive materials // Trans. ASME, Ser. E, v. 32. № 3. 1965. P. 489—492.
  - 1. Erkhov M. I. Teoriya ideal'no plasticheskikh tel i konstruktsiy M.: Nauka, 1978. 352 s.
- 2. Koshur V. D., Nemirovskiy Yu. V. Kontinual'nye i diskretnye modeli dinamicheskogo deformirovaniya elementov konstruktsii. Novosibirsk : Nauka, 1990. 198 s.
- 3. Bazhenov V. G., Lomunov V. K., Osetrov S. L. Issledovanie primenimosti zhestkoplasticheskoy modeli v zadachakh impul'snogo deformirovaniya uprugoplasticheskikh plastin pri malykh i bol'shikh progibakh // Vestnik ChGPU im. I. Ya. Yakovleva. Mekhanika predel'nogo sostoyaniya. 2008. № 1. S. 64—69.
- 4. *Starov A. V.* Polnaya sistema uravneniy dinamicheskogo udarnogo nagruzheniya zhestkoplasticheskikh pologikh obolochek vrashcheniya s uchetom bol'shikh progibov // Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy. 2011. № 4. S. 26—31.

- 5. Sebekina V. I., D'yachkov G. F., Starov A. V. Otsenka ostatochnykh peremeshcheniy kruglykh ploskikh membran pri dinamicheskom nagruzhenii // Issledovaniya po raschetu stroitel'nykh konstruktsiy i nadezhnosti sooruzheniy: sb. nauch. tr. TsNIISK im. Kucherenko. M.: TsNIISK im. Kucherenko, 1987. S. 152—163.
- 6. *Perrone N.* On a simplified method of solving impulsively loaded structures of rate sensitive materials // Trans. ASME, Ser. E, v. 32.  $N_2$  3. 1965. P. 489—492.

© Старов А. В., 2014

Поступила в редакцию в феврале 2014 г.

## Ссылка для цитирования:

Старов А. В. Динамика пластических оболочек с учетом упрочнения и чувствительности к скорости деформирования // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 112—118.

УДК 624.046.2

### А. В. Старов

## ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ КРУГЛЫХ ПЛАСТИНОК С ЗАЩЕМЛЕНИЕМ КРАЯ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ ЖЕСТКИМ ШТАМПОМ

Рассмотрена задача пластического деформирования круглых пластинок с жестким защемлением края под действием локальной осесимметричной нагрузки с учетом больших прогибов. Используется модель жесткопластического тела, условие пластичности Мизеса, соотношения теории пластического течения. Получено аналитическое решение в параметрическом виде.

К л ю ч е в ы е с л о в а: круглые пластинки, пластическое деформирование, локальные нагрузки, физически и геометрически нелинейные задачи.

The problem of plastic deformation of circular plates with rigid fixing of the edge under local axially symmetric loading in view of greater sags is considered. The model of rigidly plastic skew field, Mizes's plastic condition, the correlation of the theory of plastic flow are used. The analytical solution in parametrical form is received.

 $K\ e\ y\ w\ o\ r\ d\ s:\ circular\ plate,\ plastic\ deformation,\ local\ loadings,\ physically\ and\ geometrically\ nonlinear\ problems.$ 

При нагружении круглой пластинки жестким штампом либо действии на пластинку ступенчато переменной толщины сосредоточенной нагрузки большой интенсивности, превышающей несущую способность, возникают большие пластические деформации. Подобные задачи в геометрически линейной постановке были получены в [1—3].

В [4] на основе модели жесткопластического тела предложена методика расчета круглых пластинок с жестким защемлением края при локальном нагружении распределенной нагрузкой с учетом больших прогибов.

В настоящей статье методика распространяется на действие нагрузки локального характера, распределенной по окружности.

Пусть круглая пластинка с жестким защемлением края находится под действием равномерно распределенной нагрузки по окружности  $\rho = \beta$ . Уравнения равновесия в полярной системе координат в рамках теории Кармана в безразмерном виде:

$$n_2 - \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho n_1) = 0, \ m_2 - \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho m_1) - \rho Q = 0, \ \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho Q) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho n_1 \frac{\partial w}{\partial \rho}) = 0. (1)$$

Граничные условия:

$$m_1(0) = m_2(0), \ Q(0) = 0, \ \frac{\partial w}{\partial \rho}(0) = 0, \ m_1(1) = -m, \ w(1) = 0, \ u(1) = 0.$$

Здесь вводятся безразмерные координаты и переменные:  $\rho = \overline{\rho}/\rho_0$  — радиус-вектор произвольной точки срединной поверхности;  $\rho_0$  — радиус пластинки; 2h — толщина;  $w = 2\overline{w}/h$ ,  $u = 4\overline{u}\,\rho_0/h^2$  — прогиб и радиальное перемещение;  $m_i = \overline{M}_i/\sigma_s h^2$  — изгибающие моменты;  $n_i = \overline{N}_i/2\sigma_s h$  —

продольные усилия;  $Q = \overline{Q} \rho_0 / \sigma_s h^2$  — поперечная сила;  $P = \overline{P} \rho_0 / \sigma_s h^2$  — параметр внешней нагрузки, распределенной по окружности ;  $\sigma_s$  — предел текучести материала; i = 1, 2 — индексы радиального и окружного направления. На размерность соответствующей величины указывает горизонтальная черта.

Скорости деформаций и скорости изменения кривизны срединной поверхности соответственно равны:

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{h^2}{4\rho_0^2} \left( \frac{\partial \dot{u}}{\partial \rho} + \frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho} \frac{\partial w}{\partial \rho} \right), \ \dot{\varepsilon}_2 = \frac{h^2}{4\rho_0^2} \frac{\dot{u}}{\rho}, \ \dot{\chi}_1 = -\frac{h}{2\rho_0^2} \frac{\partial^2 \dot{w}}{\partial \rho^2}, \ \dot{\chi}_2 = -\frac{h}{2\rho_0^2} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho}.$$

Функция нагрузки  $P = P(\rho)$  имеет вид:

$$P(\rho) = 0 \quad (0 \le \rho \le a), \quad P(\rho) = P(\rho = \beta), \quad P(\rho) = 0 \quad (b \le \rho \le 1).$$

Учет взаимного влияния изгибающих моментов и продольных усилий выполняется на основе поверхности текучести для оболочек со сплошным однослойным сечением, построенной на основе условия пластичности Мизеса [5]:

$$m_1^2 - m_1 m_2 + m_2^2 + n_1^2 - n_1 n_2 + n_2^2 = k^2$$
 (2)

Предположим, что распределение нормальных сил не зависит от радиуса, то есть  $n_1 = n_2 = n$ , что соответствует стремлению деформированной пластинки к безмоментному состоянию. Тогда можно получить эллипс текучести

$$m_1^2 - m_1 m_2 + m_2^2 = k^2 - n^2, (3)$$

линейная аппроксимация которого представляет собой шестиугольник текучести, вписанный в эллипс (3):

$$|m_2 - m_1| \le m, \ |m_i| \le m, \ m = \sqrt{k^2 - n^2}.$$
 (4)

Согласно (4) возможными являются следующие пластические режимы:

A. 
$$m_1 = m_2 = m$$
,  $n_1 = n_2 = n$ ; AB.  $0 \le m_1 \le m_2 = m$ ,  $n_1 = n_2 = n$ ;  
B.  $m_1 = 0$ ,  $m_2 = m$ ,  $n_1 = n_2 = n$ ; BC.  $m_2 - m_1 = m$ ,  $n_1 = n_2 = n$ . (5)

Кусочно-линейные условия пластичности приводят к разделению срединной поверхности на ряд зон, границы которых подвижны и зависят от деформированного состояния. Из условия непрерывности и дифференцируемости скоростей на границах раздела зон с различным пластическим состоянием должны выполняться кинематические условия совместности для слабых разрывов, характер которых описан в [5]:

$$\left[\frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho}\right] + \dot{\rho}_i \left[\frac{\partial^2 w}{\partial \rho^2}\right] = 0 \Big|_{\rho = \rho_i}, \left[\ddot{w}\right] + \dot{\rho}_i \left[\frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho}\right] = 0 \Big|_{\rho = \rho_i},$$
 (6)

здесь  $\rho = \rho_i$  — радиус границы раздела зон с различным пластическим режимом, точка — дифференцирование по неубывающему параметру нагружения, квадратные скобки — разрыв соответствующей величины.

Возможные пластические механизмы деформирования круглой пластинки, соответствующие участкам поверхностей текучести (4): в центральной зоне  $0 \le \rho \le \beta$  реализуется пластический режим A, соответствующий участку  $m_1 = m_2 = m, \ n_1 = n_2 = n$ . Из уравнений равновесия (1) следует  $w = w_0, \ \frac{\partial w}{\partial \rho} = 0$ , что отвечает закону течения  $\dot{\chi}_1 \ge 0, \ \dot{\chi}_2 \ge 0$ ; для зоны  $\beta \le \rho \le \rho_2$  возможным является режим AB:  $0 \le m_1 \le m_2 = m, \ n_1 = n_2 = n$ . На основании закона течения  $\dot{\chi}_1 = 0$ , то есть распределение прогибов и скоростей прогибов в этой зоне — линейная функция.

Зона  $\rho_2 \leq \rho \leq 1$ . Здесь для режима BC  $m_2-m_1=m,\ n_1=n_2=n$  . На основании ассоциированного закона течения  $\dot{\chi}_1+\dot{\chi}_2=0$  , отсюда распределение прогибов в этой зоне

$$w = w_2 \frac{\ln \rho}{\ln \rho_2}, \ \left(\rho_2 \le \rho \le 1\right). \tag{7}$$

Функция прогибов в зоне  $\beta \le \rho \le \rho_2$  с учетом условий непрерывности наклонов и прогибов при  $\rho = \rho_2$  будет имеет вид

$$w = w_0 \frac{\rho_2 (1 - \ln \rho_2) - \rho}{\rho_2 (1 - \ln \rho_2) - \beta}, \quad (\beta \le \rho \le \rho_2).$$
 (8)

Распределение прогибов в зоне  $(\rho_2 \le \rho \le 1)$  с учетом (8)

$$w = -w_0 \frac{\rho_2 \ln \rho}{\rho_2 (1 - \ln \rho_2) - \beta}, \quad (\rho_2 \le \rho \le 1). \tag{9}$$

В формулах (7)—(9)  $w_0, w_2$  — характерные прогибы на границах раздела пластических режимов  $\rho = \beta$ ,  $\rho = \rho_2$ . Найдем скачки соответствующих величин при  $\rho = \beta$  согласно (8), (9) и подставим в первое уравнение (6):

$$\left[\frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho}\right] \neq 0 \Big|_{\rho=\beta}$$
,  $\left[\frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho}\right] = 0 \Big|_{\rho=\rho_2}$ ,  $\left[\frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho}\right] \neq 0 \Big|_{\rho=1}$ , что соответствует стационар-

ным шарнирным окружностям при  $\rho = \beta$ ,  $\rho = 1$  и подвижной границе пластических режимов при  $\rho = \rho_2$ .

Зона  $\beta \leq \rho \leq \rho_2$ . Интегрируя уравнения равновесия (1) с учетом (8) и граничных условий  $m_1=m$ ,  $\rho Q=P\beta+n\frac{\partial w}{\partial \rho}\beta$  при  $\rho=\beta$ , получим распределение поперечных сил и радиальных моментов

$$\rho Q = P\beta - n \frac{w_0}{\rho_2 \left(1 - \ln \rho_2\right) - \beta} \rho , \qquad (10)$$

$$m_1 = m + n \frac{w_0}{2(\rho_2(1 - \ln \rho_2) - \beta)} \left(\rho - \frac{\beta^2}{\rho}\right) - P\beta \left(1 - \frac{\beta}{\rho}\right). \tag{11}$$

Учитывая граничное условие  $m_1 = 0$  при  $\rho = \rho_2$ , из (11) следует

$$P\beta \left(1 - \frac{\beta}{\rho_2}\right) = m + n \frac{w_0}{2\rho_2(\rho_2(1 - \ln \rho_2) - \beta)} (\rho_2^2 - \beta^2). \tag{12}$$

Зона  $\rho_2 \leq \rho \leq 1$ . Интегрируя уравнения равновесия (1) с учетом (9) и граничных условий  $m_1=0, \ \rho Q=P\beta+n\frac{\partial w}{\partial \rho}\rho_2$  при  $\rho=\rho_2$ , получим распределение поперечных сил и радиальных моментов

$$\rho Q = P\beta - n \frac{w_0 \rho_2}{\rho_2 \left(1 - \ln \rho_2\right) - \beta},\tag{13}$$

$$m_1 = \left(m + n \frac{w_0 \rho_2}{\left(\rho_2 \left(1 - \ln \rho_2\right) - \beta\right)} - P\beta\right) \ln \frac{\rho}{\rho_2}. \tag{14}$$

Граничное условие  $m_1 \Big|_{\rho=1} = -m$  дает второе соотношение между параметрами  $w_0$ ,  $\rho_2$ ,  $\beta$  и параметром нагрузки

$$P\beta \frac{\ln \rho_2}{(\ln \rho_2 - 1)} = m + n \frac{w_0 \rho_2}{(\rho_2 (1 - \ln \rho_2) - \beta)} \frac{\ln \rho_2}{(\ln \rho_2 - 1)}.$$
 (15)

Представим зависимости (12) и (15) в виде  $PY = m + nw_0 Z$ ,  $PK = m + nw_0 X$ .

Зависимость  $n = n(w_0, \rho_2)$  найдем из условия максимума безусловной функции, образованной из уравнений (12) и (15):

$$\Phi = (PY - m - nw_0Z) + \lambda (P(Y - K) - nw_0(Z - X)),$$

где  $\lambda$  — неопределенный множитель Лагранжа,

$$Y = \beta \left( 1 - \frac{\beta}{\rho_2} \right), \ Z = \frac{\left( \rho_2^2 - \beta^2 \right)}{2\rho_2 \left( \rho_2 \left( 1 - \ln \rho_2 \right) - \beta \right)},$$
$$K = \frac{\beta \ln \rho_2}{\ln \rho_2 - 1}, \ X = \frac{\rho_2 K}{\beta \left( \rho_2 \left( 1 - \ln \rho_2 \right) - \beta \right)}.$$

Искомая функция  $n = n(w_0, \rho_2)$  следует из решения системы уравнений:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \rho_2} = 0.$$

Определяя соответствующие частные производные, получим зависимость мембранного усилия как функцию  $w_0$  и  $\rho_2$ :

$$\frac{n}{m} = w_0 \left( Z + \lambda \left( Z - X \right) \right),\tag{16}$$

где 
$$\lambda = -\frac{\left(Z - X\right)\frac{\partial Y}{\partial \rho_2} - \left(Y - K\right)\frac{\partial Z}{\partial \rho_2}}{\left(Z - X\right)\left(\frac{\partial Y}{\partial \rho_2} - \frac{\partial K}{\partial \rho_2}\right) - \left(Y - K\right)\left(\frac{\partial Z}{\partial \rho_2} - \frac{\partial X}{\partial \rho_2}\right)}.$$
 (17)

Исключая из уравнений (12) и (15) параметр нагрузки, с учетом (16) получим зависимость между параметрами  $w_0$  и  $\rho_2$ :

$$w_0^2 (Z + \lambda (Z - X)) (ZK - XY) - (Y - K) = 0.$$
 (18)

Изложенное выше решение задачи можно получить, приравнивая мощность диссипации энергии для пластинки мощности внешней нагрузки. Поле перемещений и скоростей перемещений согласно (8) и (9) имеет вид

$$w = \phi(\rho_2(1 - \ln \rho_2) - \rho), \dot{w} = \dot{\phi}(\rho_2(1 - \ln \rho_2) - \rho) - \phi\dot{\rho}_2 \ln \rho_2, (\beta \le \rho \le \rho_2), (19)$$

$$w = -\phi \rho_2 \ln \rho_2, \ \dot{w} = -\dot{\phi} \rho_2 \ln \rho_2 - \phi \dot{\rho}_2 \ln \rho_2, \ (\rho_2 \le \rho \le 1), \tag{20}$$

где 
$$\varphi = w_0 \left( \rho_2 \left( 1 - \ln \rho_2 \right) - \beta \right)^{-1}$$
.

Мощность внешней нагрузки определяется выражением

$$A = 2\pi P \beta \dot{w} = 2\pi P \beta \left( \dot{\varphi} \left( \rho_2 \left( 1 - \ln \rho_2 \right) - \beta \right) - \varphi \dot{\rho}_2 \ln \rho_2 \right). \tag{21}$$

Мощность диссипации энергии в обобщенных напряжениях и скоростях перемещений имеет вид

$$D = 2\pi \int_{0}^{1} (\dot{\varepsilon}_{i} n_{i} + \dot{\chi}_{i} m_{i}) \rho d\rho + 2\pi \rho_{i} \left\{ \left[ \left[ \frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho} \right] m_{1} \right] + \left[ \left[ \dot{u} \right] \right] n_{1} \right\} \Big|_{\rho = \rho_{i}},$$
(22)

где  $\rho_i$  — граница раздела между зонами с различным пластическим состоянием; квадратные скобки — возможные разрывы в скоростях наклона и скоростях радиальных перемещений.

Определяя скорости деформаций и скорости изменения кривизны с учетом (19) и (20), подставляя полученные выражения в (22) и интегрируя по всей площади срединной поверхности пластинки, можно получить выражение для мощности диссипации энергии

$$\frac{D}{2\pi} = m\left(\dot{\varphi}\rho_2\left(2 - \ln\rho_2\right) - \varphi\dot{\rho}_2\ln\rho_2\right) + n\left(\dot{\varphi}\varphi\left(\frac{\rho_2^2}{2} - \frac{\beta_2^2}{2}\right) - \varphi\rho_2\left(\dot{\varphi}\rho_2 + \varphi\dot{\rho}_2\right)\ln\rho_2\right).$$

Составляя равенство мощностей A = D и полагая для квазистатической задачи  $\dot{\varphi} \neq 0$ ,  $\dot{\varphi}_2 \neq 0$ , можно получить систему разрешающих уравнений

$$P\beta(\rho_{2}(1-\ln\rho_{2})-\beta) = m\rho_{2}(2-\ln\rho_{2}) + n\phi\left(\frac{\rho_{2}^{2}}{2} - \frac{\beta_{2}^{2}}{2} - \phi\rho_{2}^{2}\ln\rho_{2}\right), \tag{23}$$

$$P\beta \ln \rho_2 = m(\ln \rho_2 - 1) + n\phi \rho_2 \ln \rho_2.$$

Комбинируя уравнения системы (23), получим формулы, совпадающие с (13) и (16).

На рис. 1, 2 представлены графики зависимости «нагрузка — прогиб» в центре пластинки для локальной нагрузки, где  $P^*=2\pi P\beta$  — «приведенная» сосредоточенная нагрузка.

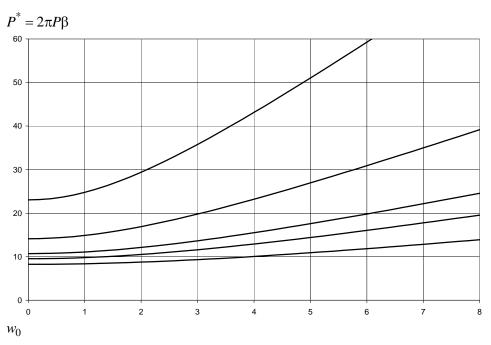


Рис. 1. Графики зависимости «нагрузка — прогиб» в центре пластинки для локальной нагрузки при  $\beta=0,01,\,0,05,\,\,0,1,\,\,0,25,\,\,0,5$ 

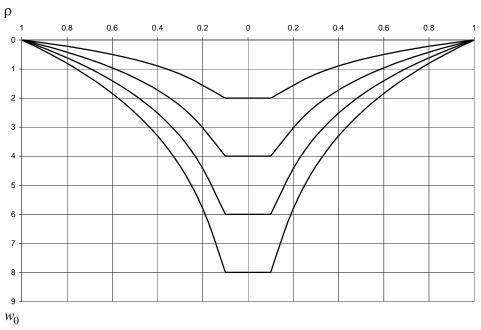


Рис. 2. Эпюры прогибов срединной поверхности пластинки с жестким защемлением края при  $\beta=0,1,\ w_0=0...8$ 

Решение в геометрически линейной постановке [1—3] может быть получено, если полагать в соответствующих формулах  $w_0 = 0$ .

Таким образом, получено аналитическое решение физически и геометрически нелинейной краевой задачи в параметрическом виде, которое имеет самостоятельное прикладное значение и может быть использовано для тестирования численных результатов на основе более сложных упругопластических моделей с использованием реальной диаграммы деформирования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Шапиро Г. С.* Упругопластический изгиб круглой пластинки и существование жесткопластической задачи // Известия АН СССР, Отделение технических наук, механики и машиностроения. 1961. № 2.
- 2. Zaid M. On the carrying capacity of plates of arbitrary shape and variable fixity under a concentrated load // Journal of Applied Mechanics. 25. 1958. P. 598—602.
- 3. Schumann W. On limit analysis of plates // Quarterly of Applied Mathematics. 16. 1958. P. 16—71.
- 4. *Старов А. В.* Пластическое деформирование круглых пластинок с жестким защемлением края при локальном нагружении // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стрво и архит. 2013. Вып. 34(53). С. 99—106.
  - 5. Ерхов М. И. Теория идеально-пластических тел и конструкций. М.: Наука, 1978. 352 с.
- 1. Shapiro G. S. Uprugoplasticheskiy izgib krugloy plastinki i sushchestvovanie zhestkoplasticheskoy zadachi // Izvestiya AN SSSR, Otdelenie tekhnicheskikh nauk, mekhaniki i mashinostroeniva. 1961. № 2.
- 2. Zaid M. On the carrying capacity of plates of arbitrary shape and variable fixity under a concentrated load // Journal of Applied Mechanics. 25. 1958. P. 598—602.
- 3. Schumann W. On limit analysis of plates  $/\!/$  Quarterly of Applied Mathematics. 16. 1958. P. 16—71.
- 4. *Starov A. V.* Plasticheskoe deformirovanie kruglykh plastinok s zhestkim zashchemleniem kraya pri lokal'nom nagruzhenii // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2013. Vyp. 34(53). S. 99—106.
  - 5. Erkhov M. I. Teoriya ideal'no-plasticheskikh tel i konstruktsiy. M.: Nauka, 1978. 352 s.

© Старов А. В., 2014

Поступила в редакцию в феврале 2014 г.

## Ссылка для цитирования:

Старов А. В. Пластическое деформирование круглых пластинок с защемлением края при локальном нагружении жестким штампом // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 119—125.

УДК 624.046.2

### А. В. Старов

# ОБЛАСТЬ ПРИМЕНИМОСТИ ТЕОРИИ БОЛЬШИХ ПРОГИБОВ ИДЕАЛЬНО ПЛАСТИЧЕСКИХ КРУГЛЫХ ПЛАСТИНОК И ПОЛОГИХ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ

Определена область применимости теории больших прогибов жесткопластических круглых пластинок и пологих оболочек вращения. Решена задача о пластическом деформировании пластинки с шарнирно неподвижным опиранием края с использованием точных выражений для кривизны срединной поверхности. На основе анализа полученных кривых сделан вывод о возможности использования приближенных выражений для кривизны срединной поверхности при прогибах, не превышающих две-три толщины пластинки.

К л ю ч е в ы е с л о в а: круглые пластинки и пологие оболочки вращения, пластическое деформирование, геометрически нелинейные задачи.

The area of applicability of the theory of great slags of rigidly plastic circular plates and shallow roller shells is determined. The problem of plastic deformation of plates with hinged support fixed edges with the use of exact expressions for curvature of a median surface is solved. On the basis of the analysis of the received curves the author concludes about the possibility of using of approximate expressions for curvature of a median surface at the bending flexures which do not exceed two or three thickness of a plate.

 $K\ e\ y\ w\ o\ r\ d\ s$ : circular plate and shallow roller shells, plastic deformation, geometrically nonlinear problems.

Учет больших прогибов при расчете конструкций за пределом упругости дает возможность выявить дополнительные резервы несущей способности, что приводит к созданию наиболее экономичных конструктивных решений. В диапазоне действия нагрузок большой интенсивности пластические деформации и соответствующие перемещения существенно превосходят упругие и поэтому целесообразно использовать модель жесткопластического тела. Одновременно возникает необходимость учета больших перемещений, что соответствует экспериментальным данным.

Исследованием больших прогибов жесткопластических круглых пластинок для различных видов нагрузок и граничных условий занимались Е. Онат и Р. Хейзорнсвейт, Ю. Р. Лепик, М. И. Ерхов и Л. В. Кислова, а также другие авторы.

Во всех имеющихся решениях квазистатических задач выражения для кривизны срединной поверхности принимаются согласно линейной теории. Используя точные выражения для кривизны срединной поверхности [1], определим область применимости полученных решений.

В качестве основы используется решение задачи о больших прогибах жесткопластической круглой пластинки с шарнирно неподвижным опиранием края [2]. В решении выполняются кинематические условия совместности для разрывов, что позволило получить корректное решение, удовлетворяющее исходным соотношениям теории идеальной пластичности.

Уравнения равновесия в полярной системе координат имеют вид

$$\frac{\partial}{\partial \rho}(\rho n_1) - n_2 = 0, \quad m_2 - \frac{\partial}{\partial \rho}(\rho m_1) - \rho Q = 0,$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho}(\rho Q) - n_1 \frac{\partial^2 w}{\partial \rho^2} \left\{ 1 + \beta \left( \frac{\partial w}{\partial \rho} \right)^2 \right\}^{-\frac{3}{2}} - n_2 \frac{1}{\rho} \frac{\partial w}{\partial \rho} \left\{ 1 + \beta \left( \frac{\partial w}{\partial \rho} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} - P = 0.$$
(1)

Здесь введены следующие безразмерные координаты и переменные:  $\rho = \overline{\rho}/\rho_0$  — координата произвольной точки срединной поверхности;  $w = 2\overline{w}/h$ ,  $u = 4\overline{u}\rho_0/h^2$  — прогиб и радиальное перемещение;  $Q = \overline{Q}\rho_0/\sigma_s h^2$ ,  $P = \overline{P}\rho_0^2/\sigma_s h^2$  — поперечная сила и параметр нагрузки;  $m_i = \overline{M}_i/\sigma_s h^2$ ,  $n_i = \overline{N}_i/2\sigma_s h$  — изгибающие моменты и продольные усилия;  $\sigma_s$  — предел текучести материала;  $\rho_0$  — радиус пластинки; 2h — толщина пластинки;  $\beta = h^2/4\rho_0^2$  — геометрический параметр, характеризующий отношение толщины к радиусу пластинки; i=1,2 — индексы, соответствующие радиальному и окружному направлениям. Горизонтальная черта указывает на размерность величины.

Граничные условия:

$$m_1(0) = m_2(0), \ Q(0) = 0, \ \frac{\partial w}{\partial \rho}(0) = 0, \ m_1(1) = 0, \ w(1) = u(1) = 0.$$

Поле радиальных перемещений не рассматривается.

Будем использовать гиперповерхность текучести, построенную для оболочек со сплошным однослойным сечением на основе условия пластичности Мизеса в работе [3]:

$$m_1^2 - m_1 m_2 + m_2^2 + n_1^2 - n_1 n_2 + n_2^2 = k^2. (2.1)$$

Поскольку учет больших прогибов оказывает влияние на вид кривых равновесных состояний в области значительных мембранных усилий, для оценки применимости приближенных выражений кривизны срединной поверхности также будем использовать поверхность текучести ограниченного взаимодействия, описанную около точной

$$|n_1| \le k, |n_2| \le k, |n_2 - n_1| \le k, |m_1| \le k, |m_2| \le k, |m_2 - m_1| \le k,$$
 (2.2)

где  $k \ge 1$  (в расчетах принято k = 1).

В процессе пластического деформирования срединная поверхность пластинки разделяется на пластические зоны, описываемые участками поверхности текучести (2), причем на нестационарных границах раздела зон с различным пластическим состоянием из условия непрерывности и дифференцируемости скоростей должны выполняться соотношения для разрывов, называемые кинематическими условиями совместности:

$$\left[\frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho}\right] + \dot{\rho}_1 \left[\frac{\partial^2 w}{\partial \rho^2}\right] = 0 \bigg|_{\rho = \rho_1}, \quad \left[\ddot{w}\right] + \dot{\rho}_1 \left[\frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho}\right] = 0 \bigg|_{\rho = \rho_1}, \quad (3)$$

где  $\rho_1$  — радиус границы раздела зон; точка показывает дифференцирование по любому неубывающему параметру при квазистатическом нагружении, квадратные скобки заключают разрыв соответствующей величины. Анализ соотношений (3) показывает, что на стационарных границах раздела пластических режимов возможны разрывы в наклонах срединной поверхности, а на нестационарных — в скоростях наклона, разрывы кривизны и вторых производных по параметру нагружения.

Пусть напряженное состояние соответствует режиму  $m_1=m_2=m,\; n_1=n_2=n\;$  для центральной зоны  $0\leq \rho \leq \rho_1\;$  и режиму  $0\leq m_1=m_2=m,\; n_1=n_2=n\;$  для пограничной  $\rho_1\leq \rho \leq 1\;$ .

Интегрируя уравнения равновесия (1) в центральной зоне с учетом граничных условий  $m_1=m_2=m,\ n_1=n_2=n$  , при  $\rho=0$  можно получить распределение прогибов

$$w = w_0 - \frac{2n}{\beta P} + \frac{2n}{\beta P} \left\{ 1 - \beta \left( \frac{P\rho}{2n} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (0 \le \rho \le \rho_1) , \qquad (4)$$

где  $w_0$  — прогиб в центре пластинки.

В пограничной зоне на основании закона течения распределение прогибов и скоростей прогибов имеет вид

$$w = \frac{w_1}{(1 - \rho_1)} (1 - \rho), \quad \dot{w} = \left(\frac{w_1}{1 - \rho_1}\right) (1 - \rho), \quad (\rho_1 \le \rho \le 1), \tag{5}$$

где  $w_1$  — характерный прогиб срединной поверхности на границе раздела пластических режимов  $\rho = \rho_1$ .

Определяя разрывы соответствующих величин согласно (4) и (5) и подставляя полученные равенства в первое условие для разрывов (3), можно получить уравнение

$$\left(\frac{w_1}{1-\rho_1}\right) = \left(\frac{P}{2n}\right) \rho_1 \left\{1-\beta \left(\frac{P\rho_1}{2n}\right)^2\right\}^{\frac{3}{2}}.$$
(6)

С другой стороны, можно заметить, что

$$\left\{ \left( \frac{P\rho_1}{2n} \right) \left\{ 1 - \beta \left( \frac{P\rho_1}{2n} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \right\} = \left( \frac{P\rho_1}{2n} \right) \left\{ 1 - \beta \left( \frac{P\rho_1}{2n} \right)^2 \right\}^{-\frac{3}{2}}.$$
(7)

Сопоставляя равенства (6) и (7), получим уравнение

$$\left(\frac{w_1}{1-\rho_1}\right) = \left\{ \left(\frac{P\rho_1}{2n}\right) \left\{ 1 - \beta \left(\frac{P\rho_1}{2n}\right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \right\}.$$
(8)

Интегрируя его с учетом начального условия для квазистатической задачи  $w_1 = 0$  при  $\rho_1 = 0$ , можно получить

$$w_{1} = \left(\frac{P\rho_{1}}{2n}\right) (1 - \rho_{1}) \left\{ 1 - \beta \left(\frac{P\rho_{1}}{2n}\right)^{2} \right\}^{-\frac{1}{2}}.$$
 (9)

Второе условие для разрывов (3) выполняется тождественно. Из (4) при  $\rho = \rho_1$  и (9) после исключения  $w_1$  следует

$$w_0 = \frac{2n}{\beta P} - \frac{2n}{\beta P} \left\{ 1 - \beta \left( \frac{P\rho_1}{2n} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} + \frac{P\rho_1}{2n} (1 - \rho_1) \left\{ 1 - \beta \left( \frac{P\rho_1}{2n} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}}.$$
 (10)

В пограничной зоне  $\rho_1 \le \rho \le 1$  согласно (5) и (9) имеем

$$\frac{\partial w}{\partial \rho} \left\{ 1 + \beta \left( \frac{\partial w}{\partial \rho} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} = -\frac{P\rho_1}{2n}, \quad (\rho_1 \le \rho \le 1). \tag{11}$$

Интегрированием (1) с учетом (11) и граничными условиями  $m_1 = m_2$ , Q = 0 при  $\rho = \rho_1$ ,  $m_1 = 0$  при  $\rho = 1$  можно получить распределение радиальных моментов и выражение для нагрузки, совпадающие с соответствующими формулами работы [2]:

$$m_1 = m + \frac{P}{12\rho} \left( 3\rho_1 \rho^2 - 2\rho^3 - \rho_1^3 \right), \ P = \frac{12m}{\rho_1^3 - 3\rho_1 + 2}.$$
 (12)

Формулу (10) можно переписать в виде

$$w_0 \sqrt{1 - \beta \left(\frac{P\rho_1}{2n}\right)^2} = \frac{2n}{\beta P} \left[ \sqrt{1 - \beta \left(\frac{P\rho_1}{2n}\right)^2} - 1 \right] + \frac{P\rho_1}{2n} . \tag{13}$$

Избавляясь от радикалов, получим зависимость

$$w_0 \left[ 1 - \beta \left( \frac{P\rho_1}{2n} \right)^2 \right] - \frac{P\rho_1(2 - \rho_1)}{4n} = \frac{P\beta}{4n} \left\{ w_0^2 \left[ 1 - \beta \left( \frac{P\rho_1}{2n} \right)^2 \right] - \left( \frac{P\rho_1}{2n} \right)^2 \right\}. \tag{14}$$

Правая часть (14) представляет собой величину второго порядка малости. Приравнивая ее нулю, окончательно найдем

$$w_0 = \frac{P\rho_1(2-\rho_1)}{4n} \left[ 1 - \beta \left( \frac{P\rho_1}{2n} \right)^2 \right]^{-1}.$$
 (15)

Представим зависимости (12) и (15) в виде

$$PY = m, \ w_0 = \frac{PZ}{n} \left[ 1 - \beta \left( \frac{P\rho_1}{2n} \right)^2 \right]^{-1}.$$
 (16)

Зависимость  $n = n(\rho_1)$  найдем из условия максимума безусловной функции, образованной из уравнений (16):

$$\Phi = (PY - m) + \lambda \left( w_0 \left[ 1 - \beta \left( \frac{P\rho_1}{2n} \right)^2 \right] - \frac{PZ}{n} \right), \tag{17}$$

где λ — неопределенный множитель Лагранжа,

$$Y = \frac{\rho_1^3 - 3\rho_1 + 2}{12}, \ Z = \frac{\rho_1 \left(2 - \rho_1\right)}{4}. \tag{18}$$

Искомая функция  $n = n(\rho_1)$  следует из решения системы уравнений

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \rho_1} = 0.$$

Определяя соответствующие частные производные, получим зависимость мембранного усилия как функцию P и  $\rho_1$ :

$$\frac{n^2}{m^2} = -\frac{Z}{Y} \frac{\partial Y}{\partial \rho_1} \left[ 1 + \beta \left( \frac{P\rho_1}{2n} \right)^2 \right] \left[ \frac{\partial Z}{\partial \rho_1} + \frac{1}{2} \beta \left( \frac{P\rho_1}{2n} \right)^2 \right]^{-1}.$$
 (19)

Исключая параметр нагрузки с помощью соотношений (16), получим биквадратное уравнение для определения  $n = n(\rho_1)$ :

$$\frac{n^2}{m^2} \left[ \frac{\partial Z}{\partial \rho_1} + \frac{1}{2} \beta \frac{m^2}{n^2} \left( \frac{\rho_1}{2Y} \right)^2 \right] + \frac{Z}{Y} \frac{\partial Y}{\partial \rho_1} \left[ 1 + \beta \frac{m^2}{n^2} \left( \frac{\rho_1}{2Y} \right)^2 \right] = 0.$$
 (20)

На рис. 1, 2 показаны графики зависимости «нагрузка — прогиб в центре пластинки», построенные с использованием условия пластичности (2.1) и (2.2).

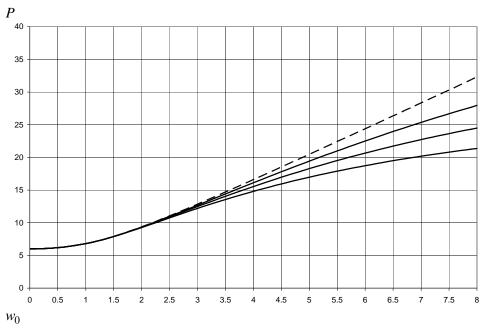


Рис. 1. Графики зависимости «нагрузка — прогиб в центре пластинки», построенные с использованием условия пластичности (2.1) и точных выражений для кривизны срединной поверхности при  $\beta = 0, 0,001, 0,0025, 0,005$ 

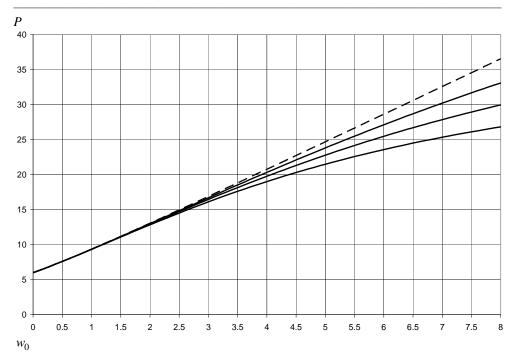


Рис. 2. Графики зависимости «нагрузка — прогиб в центре пластинки», построенные с использованием условия пластичности (2.2) и точных выражений для кривизны срединной поверхности при  $\beta = 0, 0,001, 0,0025, 0,005$ 

Штриховая линия соответствует решению с использованием выражений для кривизны срединной поверхности согласно линейной теории  $\beta=0$ . Сплошная линия соответствует решению аналогичной задачи с учетом точных выражений кривизны срединной поверхности  $\beta=0,001,\ 0,0025,\ 0,005$ , что соответствует пластинке с отношением толщины к диаметру  $1:15,\ 1:10,\ 1:8$ .

Анализ графиков позволяет сделать вывод о возможности применения приближенных выражений для кривизны срединной поверхности при прогибах, не превышающих две-три толщины пластинки. В сокращенном варианте материалы данной статьи представлены в [4].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Вольмир А. С. Гибкие пластинки и оболочки. М.: Гостехиздат, 1956. 419 с.
- 2. Ерхов М. И., Кислова Л. В. Большие прогибы жесткопластических круглых пластинок с шарнирным опиранием края // Исследования по строительной механике и методам расчета. М.: Госстройиздат, 1981. С. 4 11.
  - 3. Ерхов М. И. Теория идеально-пластических тел и конструкций. М.: Наука, 1978. 352 с.
- 4. *Ерхов М. И., Старов А. В.* Пределы применимости теории больших прогибов идеально пластических круглых пластинок // Труды XIV Всесоюзной конференции по теории пластин и оболочек. Тбилиси, 1987. Т. 1. С. 524—529.
  - 1. Vol'mir A. S. Gibkie plastinki i obolochki. M.: Gostekhizdat, 1956. 419 s.
- 2. Erkhov M. I., Kislova L. V. Bol'shie progiby zhestkoplasticheskikh kruglykh plastinok s sharnirnym opiraniem kraya // Issledovaniya po stroitel'noy mekhanike i metodam rascheta. M. : Gosstroyizdat, 1981. S. 4-11.

3. Erkhov M. I. Teoriya ideal'no-plasticheskikh tel i konstruktsiy. M.: Nauka, 1978. 352 s.

4. Erkhov M. I., Starov A. V. Predely primenimosti teorii bol'shikh progibov ideal'no plasticheskikh kruglykh plastinok // Trudy XIV Vsesoyuznoy konferentsii po teorii plastin i obolochek. Tbilisi, 1987. T. 1. S. 524—529.

© Старов А. В., 2014

Поступила в редакцию в январе 2014 г.

## Ссылка для цитирования:

Старов А. В. Область применимости теории больших прогибов идеально пластических круглых пластинок и пологих оболочек вращения // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 126—132.

УДК 624.046.2

### А. В. Старов

## ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ КРУГЛЫХ ПЛАСТИНОК С ШАРНИРНЫМ ОПИРАНИЕМ КРАЯ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ ЖЕСТКИМ ШТАМПОМ

Рассмотрена задача пластического деформирования круглых пластинок с шарнирным опиранием края под действием локальной осесимметричной нагрузки с учетом больших прогибов. Используется модель жесткопластического тела, условие пластичности Мизеса, соотношения теории пластического течения. Получено аналитическое решение в параметрическом виде.

К л ю ч е в ы е с л о в а: круглые пластинки, пластическое деформирование, локальные нагрузки, физически и геометрически нелинейные задачи.

The problem of plastic deformation of circular plates with hinged edge under local axially symmetric loading in view of greater sags is considered. The model of rigidly plastic skew field, Mizes's plastic condition, the correlation of the theory of plastic flow are used. The analytical solution in parametrical form is received.

 $K\ e\ y\ w\ o\ r\ d\ s$ : circular plate, plastic deformation, local loadings, physically and geometrically nonlinear problems.

В работе [1] разработана методика расчета круглых пластинок с шарнирным опиранием края под действием распределенной локальной нагрузки с учетом больших прогибов на основе модели жесткопластического тела.

Решения подобных задач в геометрически линейной постановке впервые были получены Г. Гопкинсом и В. Прагером [2].

В настоящей статье полученные решения распространяются на действие нагрузки локального характера, распределенной по окружности. Подобные задачи возникают при нагружении жестким штампом либо сосредоточенной нагрузкой на пластинку ступенчато переменной толщины. Обзор и существование подобных решений задач в геометрически линейной постановке были получены в [3—5].

Предположим, что круглая пластинка с шарнирным опиранием края находится под действием равномерно распределенной нагрузки по окружности  $\rho = \beta$ . Уравнения равновесия в полярной системе координат с учетом допущений теории пологих оболочек записываются в безразмерном виде

$$n_2 - \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho n_1) = 0, \ m_2 - \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho m_1) - \rho Q = 0, \ \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho Q) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho n_1 \frac{\partial w}{\partial \rho}) = 0. (1)$$

Граничные условия:

$$m_1(0) = m_2(0)$$
,  $Q(0) = 0$ ,  $\frac{\partial w}{\partial 0}(0) = 0$ ,  $m_1(1) = 0$ ,  $w(1) = 0$ ,  $u(1) = 0$ .

Здесь вводятся безразмерные координаты и переменные:

 $ho=\overline{
ho}/
ho_0$  — радиус-вектор произвольной точки срединной поверхности;  $ho_0$  — радиус пластинки; 2h — толщина;  $w=2\overline{w}/h$ ,  $u=4\overline{u}\,
ho_0/h^2$  — прогиб и радиальное перемещение;  $m_i=\overline{M}_i/\sigma_s h^2$  — изгибающие моменты;

 $n_i = \overline{N}_i/2\sigma_s h$  — продольные усилия;  $Q = \overline{Q}\rho_0/\sigma_s h^2$  — поперечная сила;  $P = \overline{P}\rho_0/\sigma_s h^2$  — параметр внешней нагрузки, распределенной по окружности;  $\sigma_s$  — предел текучести материала; i=1, 2 — индексы радиального и окружного направления. На размерность соответствующей величины указывает горизонтальная черта.

Скорости деформаций и скорости изменения кривизны срединной поверхности соответственно равны:

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{h^2}{4\rho_0^2} \left( \frac{\partial \dot{u}}{\partial \rho} + \frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho} \frac{\partial w}{\partial \rho} \right), \ \dot{\varepsilon}_2 = \frac{h^2}{4\rho_0^2} \frac{\dot{u}}{\rho}, \ \dot{\chi}_1 = -\frac{h}{2\rho_0^2} \frac{\partial^2 \dot{w}}{\partial \rho^2}, \ \dot{\chi}_2 = -\frac{h}{2\rho_0^2} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho}.$$

Функция нагрузки  $P = P(\rho)$  имеет вид:

$$P(\rho) = 0 \quad (0 \le \rho \le a), \quad P(\rho) = P(\rho = \beta), \quad P(\rho) = 0 \quad (b \le \rho \le 1).$$

Для учета взаимного влияния изгибающих моментов и продольных усилий используется поверхность текучести для оболочек со сплошным однослойным сечением, построенная на основе условия пластичности Мизеса [6]:

$$m_1^2 - m_1 m_2 + m_2^2 + n_1^2 - n_1 n_2 + n_2^2 = k^2. (2)$$

Принимая распределение нормальных сил не зависящим от радиуса пластинки, то есть  $n_1=n_2=n$ , что соответствует стремлению деформированной пластинки к безмоментному состоянию, можно получить эллипс текучести

$$m_1^2 - m_1 m_2 + m_2^2 = k^2 - n^2. (3)$$

Линейная аппроксимация (3) представляет собой шестиугольник текучести, вписанный в эллипс:

$$|m_2 - m_1| \le m, \ |m_i| \le m, \ m = \sqrt{k^2 - n^2}$$
 (4)

Согласно (4) возможными являются следующие пластические режимы:

A. 
$$m_1 = m_2 = m$$
,  $n_1 = n_2 = n$ ; AB.  $0 \le m_1 \le m_2 = m$ ,  $n_1 = n_2 = n$ ;  
B.  $m_1 = 0$ ,  $m_2 = m$ ,  $n_1 = n_2 = n$ ; BC.  $m_2 - m_1 = m$ ,  $n_1 = n_2 = n$ . (5)

Использование кусочно-линейных условий пластичности приводит к разделению срединной поверхности на пластические зоны, границы которых подвижны и зависят от деформированного состояния. Из условия непрерывности и дифференцируемости скоростей на границах раздела зон с различным пластическим состоянием должны выполняться кинематические условия совместности для слабых разрывов, характер которых описан в работах [2, 6]

$$\left[\frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho}\right] + \dot{\rho}_i \left[\frac{\partial^2 w}{\partial \rho^2}\right] = 0 \Big|_{\rho = \rho_i}, \left[\ddot{w}\right] + \dot{\rho}_i \left[\frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho}\right] = 0 \Big|_{\rho = \rho_i}, \tag{6}$$

здесь  $\rho = \rho_i$  — радиус границы раздела зон с различным пластическим режимом, точка — дифференцирование по неубывающему параметру нагружения, квадратные скобки — разрыв соответствующей величины.

Рассмотрим возможные пластические механизмы деформирования круглой пластинки, соответствующие участкам поверхностей текучести (5).

Пусть в центральной зоне  $0 \le \rho \le \beta$  реализуется пластический режим A, соответствующий участку  $m_1 = m_2 = m$ ,  $n_1 = n_2 = n$ . Из уравнений равновесия

(1) следует 
$$w = w_0$$
,  $\frac{\partial w}{\partial \rho} = 0$ , что отвечает закону течения  $\dot{\chi}_1 \ge 0$ ,  $\dot{\chi}_2 \ge 0$ .

Для зоны  $\beta \le \rho \le \rho_2$  возможным является режим AB:  $0 \le m_1 \le m_2 = m$ ,  $n_1 = n_2 = n$ . На основании закона течения  $\dot{\chi}_1 = 0$ , то есть распределение прогибов и скоростей прогибов в этой зоне — линейная функция.

Зона  $\rho_2 \leq \rho \leq 1$ . Режим BC характеризуется участками:  $m_2 - m_1 = m, \ n_1 = n_2 = n$ . На основании ассоциированного закона течения  $\dot{\chi}_1 + \dot{\chi}_2 = 0$ , отсюда следует распределение прогибов в этой зоне

$$w = w_2 \frac{\ln \rho}{\ln \rho_2}, \ \left(\rho_2 \le \rho \le 1\right). \tag{7}$$

Распределение прогибов в зоне  $\beta \le \rho \le \rho_2$  с учетом условий непрерывности наклонов и прогибов при  $\rho = \rho_2$  имеет вид

$$w = w_0 \frac{\rho_2 (1 - \ln \rho_2) - \rho}{\rho_2 (1 - \ln \rho_2) - \beta}, \quad (\beta \le \rho \le \rho_2).$$
 (8)

Распределение прогибов в зоне  $(\rho_2 \le \rho \le 1)$  с учетом (7—8)

$$w = -w_0 \frac{\rho_2 \ln \rho}{\rho_2 (1 - \ln \rho_2) - \beta}, \quad (\rho_2 \le \rho \le 1). \tag{9}$$

В формулах (7—9)  $w_0, w_2$  — характерные прогибы на границах раздела пластических режимов  $\rho = \beta, \ \rho = \rho_2$ . Определяя скачки соответствующих величин при  $\rho = \beta, \ \rho = \rho_2$  согласно (7—9) и подставляя их в первое уравнение (6), получим  $\left[\frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho}\right] \neq 0 \Big|_{\rho=\beta}, \left[\frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho}\right] = 0 \Big|_{\rho=\rho_2}$ , что соответствует стационарной шарнирной окружности при  $\rho = \beta$  и подвижной границе пластических режимов при  $\rho = \rho_2$ .

Зона  $\beta \leq \rho \leq \rho_2$ . Интегрируя уравнения равновесия (1) с учетом (8) и граничных условий  $m_1=m, \, \rho Q=P\beta+n\frac{\partial w}{\partial \rho}\beta\,$  при  $\rho=\beta$ , получим распределение поперечных сил и радиальных моментов:

$$\rho Q = P\beta - n \frac{w_0}{\rho_2 \left(1 - \ln \rho_2\right) - \beta} \rho \quad , \tag{10}$$

$$m_{1} = m_{2} + n \frac{w_{0}}{2(\rho_{2}(1 - \ln \rho_{2}) - \beta)} \left(\rho - \frac{\beta^{2}}{\rho}\right) - P\beta \left(1 - \frac{\beta}{\rho}\right). \tag{11}$$

В зоне  $\rho_2 \le \rho \le 1$  реализуется режим B, то есть  $m_1 \equiv 0$ .

Учитывая граничное условие  $m_1 = 0$  при  $\rho = \rho_2$ , из (11) следует

$$P\beta \left(1 - \frac{\beta}{\rho_2}\right) = m + n \frac{w_0}{2\rho_2(\rho_2(1 - \ln \rho_2) - \beta)} (\rho_2^2 - \beta^2). \tag{12}$$

Условие пластичности  $0 \le m_1 \le m$  в этой зоне будет выполняться, если

$$\frac{\partial m_1}{\partial \rho}\Big|_{\rho=\rho_2} = n \frac{w_0\left(\rho_2^2 + \beta^2\right)}{2\rho_2^2\left(\rho_2\left(1 - \ln \rho_2\right) - \beta\right)} - P \frac{\beta^2}{\rho_2^2} \le 0.$$

Условие  $\frac{\partial m_1}{\partial \rho}\Big|_{\rho=\rho_2}=0$  дает соотношение между параметрами  $w_0$  и  $\rho_2$ 

$$P = n \frac{w_0 \left(\rho_2^2 + \beta^2\right)}{2\beta^2 \left(\rho_2 \left(1 - \ln \rho_2\right) - \beta\right)}.$$
 (13)

Представим зависимости (12) и (13) в виде  $PY = m + nw_0Z$ ,  $P = nw_0X$ .

Зависимость  $n = n(w_0, \rho_2)$  найдем из условия максимума безусловной функции, образованной из уравнений (12) и (13):

$$\Phi = (PY - m - nw_0 Z) + \lambda (P - nw_0 X), \tag{14}$$

где λ — неопределенный множитель Лагранжа,

$$Y = \beta \left( 1 - \frac{\beta}{\rho_2} \right), \ Z = \frac{\left( \rho_2^2 - \beta^2 \right)}{2\rho_2 \left( \rho_2 \left( 1 - \ln \rho_2 \right) - \beta \right)}, \ X = \frac{\left( \rho_2^2 + \beta^2 \right)}{2\beta^2 \left( \rho_2 \left( 1 - \ln \rho_2 \right) - \beta \right)}.(15)$$

Искомая функция  $n = n(w_0, \rho_2)$  следует из решения системы уравнений:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \rho_2} = 0.$$

Определяя соответствующие частные производные, получим зависимость мембранного усилия как функцию  $w_0$  и  $\rho_2$ :

$$\frac{n}{m} = w_0 \left( Z + \lambda X \right), \ \lambda = -\left( X \frac{\partial Y}{\partial \rho_2} - \frac{\partial Z}{\partial \rho_2} \right) \left( \frac{\partial X}{\partial \rho_2} \right)^{-1}. \tag{16}$$

Исключая из (12) и (13) параметр нагрузки, получим

$$\frac{n}{m} = \frac{1}{w_0 \left( Z - XY \right)} \,. \tag{17}$$

Зависимость между параметрами  $w_0$  и  $\rho_2$  получим из уравнений (16) и (17):

$$w_0^2 (Z + \lambda X)(Z - XY) = 1.$$
 (18)

После преобразований соответствующие зависимости принимают компактный вид:

$$\frac{n}{m} = w_0 \frac{\left(\rho_2 + \beta\right)}{\left(2\rho_2 - \left(\rho_2 + \beta\right)\ln\rho_2\right)},\tag{19}$$

$$w_0^2 (\rho_2 + \beta) (\rho_2 - \beta)^2 = 2\beta (\rho_2 (1 - \ln \rho_2) - \beta) (2\rho_2 - (\rho_2 + \beta) \ln \rho_2). \tag{20}$$

Согласно (20), условие  $\frac{\partial m_1}{\partial \rho}\Big|_{\rho=\rho_2=1} \le 0$  выполняется, если

 ${w_0}^2 \left(1-\beta\right)^2 \leq 4\beta$  , то есть при выполнении этого неравенства  $\, \rho_2 = 1 \, .$ 

Зависимость  $n=n\left(w_0,\rho_2\right)$  можно найти другим способом. Комбинируя уравнения (12) и (13) с условием  $\frac{\partial P}{\partial \rho_2}=0$  , получим формулу

$$P\beta \left(1 - \frac{2\beta}{\left(2\rho_2 - (\rho + \beta)\ln\rho_2\right)}\right) = m + nw_0 \frac{(\rho_2 + \beta)}{\left(2\rho_2 - (\rho + \beta)\ln\rho_2\right)}.$$
 (21)

Условие максимума  $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$  приводит к зависимости (19), а (21) принимает вид

$$P\beta(2(\rho_2 - \beta) - (\rho_2 + \beta)\ln\rho_2) = \sqrt{(2\rho_2 - (\rho_2 + \beta)\ln\rho_2)^2 w_0^2(\rho_2 + \beta)^2}.$$
 (22)

Изложенное выше решение задачи можно получить, приравнивая мощность диссипации энергии для пластинки мощности внешней нагрузки. Поле перемещений и скоростей перемещений согласно (8) и (9) имеет вид

$$w = \phi(\rho_2(1 - \ln \rho_2) - \rho), \ \dot{w} = \dot{\phi}(\rho_2(1 - \ln \rho_2) - \rho) - \phi\dot{\rho}_2 \ln \rho_2, (\beta \le \rho \le \rho_2).$$
 (23)

$$w = -\varphi \rho_2 \ln \rho_2, \ \dot{w} = -\dot{\varphi} \rho_2 \ln \rho_2 - \varphi \dot{\rho}_2 \ln \rho_2, \ \left(\rho_2 \le \rho \le 1\right), \tag{24}$$

где  $\varphi = w_0 \left( \rho_2 \left( 1 - \ln \rho_2 \right) - \beta \right)^{-1}$ .

Мощность внешней нагрузки определяется выражением

$$A = 2\pi P \beta \dot{w} = 2\pi P \beta \left( \dot{\varphi} \left( \rho_2 \left( 1 - \ln \rho_2 \right) - \rho \right) - \varphi \dot{\rho}_2 \ln \rho_2 \right). \tag{25}$$

Мощность диссипации энергии в обобщенных напряжениях и скоростях перемещений имеет вид

$$D = 2\pi \int_{0}^{1} (\dot{\varepsilon}_{i} n_{i} + \dot{\chi}_{i} m_{i}) \rho d\rho + 2\pi \rho_{i} \left\{ \left[ \left[ \frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho} \right] m_{1} \right] + \left[ \left[ \dot{u} \right] \right] n_{1} \right\} \Big|_{\rho = \rho_{i}},$$
(26)

где  $\rho_i$  — граница раздела между зонами с различным пластическим состоянием;  $\left[\frac{\partial \dot{w}}{\partial \rho}\right]$ ,  $\left[\dot{u}\right]$  — возможные разрывы в скоростях наклона и скоростях радиальных перемещений.

Определяя скорости деформаций и скорости изменения кривизны с учетом (23) и (24), подставляя полученные выражения в (26) и интегрируя по всей площади срединной поверхности пластинки, можно получить выражение для мощности диссипации энергии.

$$\frac{D}{2\pi} = m\left(\dot{\varphi}\rho_2\left(1 - \ln\rho_2\right) - \varphi\dot{\rho}_2\ln\rho_2\right) + n\left(\dot{\varphi}\varphi\left(\frac{\rho_2^2}{2} - \frac{\beta_2^2}{2}\right) - \varphi\rho_2\left(\dot{\varphi}\rho_2 + \varphi\dot{\rho}_2\right)\ln\rho_2\right).$$

Составляя равенство мощностей A=D и полагая для квазистатической задачи  $\dot{\phi}\neq 0,~\dot{\rho}_2\neq 0,~$  можно получить систему разрешающих уравнений

$$P\beta(\rho_{2}(1-\ln\rho_{2})-\beta) = m\rho_{2}(1-\ln\rho_{2}) + n\varphi\left(\frac{\rho_{2}^{2}}{2} - \frac{\beta_{2}^{2}}{2} - \varphi\rho_{2}^{2}\ln\rho_{2}\right), \tag{27}$$

 $P\beta = m + n\varphi \rho_2$ .

Комбинируя уравнения системы (27), получим формулы, совпадающие с (12) и (13).

Анализ первой и второй производных от радиального момента в соответствии с (11) показывает, что условие пластичности (5) выполняется при любом значении параметров  $w_0$ ,  $\rho_2$  и любом значении  $\beta$ .

На рис. 1 представлены графики зависимости «нагрузка — прогиб» в центре пластинки для локальной нагрузки, где  $P^* = 2\pi P\beta$  — «приведенная» сосредоточенная нагрузка, на рис. 2 — эпюры прогибов при  $w_0 = 0...8$ .

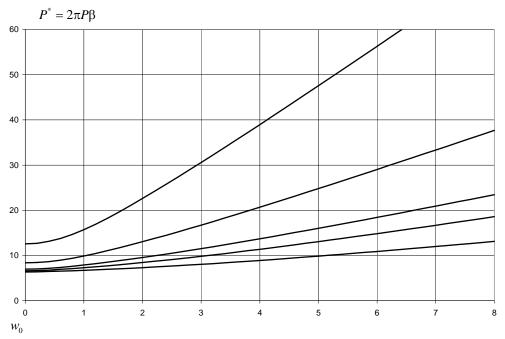


Рис. 1. Графики зависимости «нагрузка — прогиб» в центре пластинки для ло-кальной нагрузки при  $\beta$  = 0,01, 0,05, 0,1, 0,25, 0,5  $\rho$ 

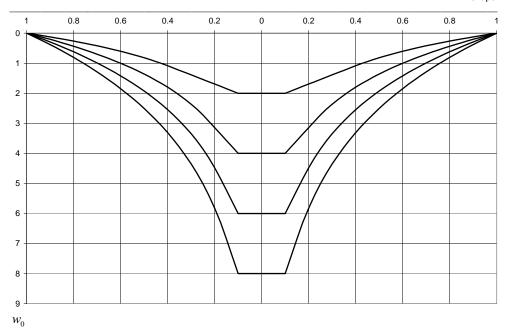


Рис. 2. Эпюры прогибов срединной поверхности пластинки с шарнирным опиранием края при  $\beta = 0.1, \ w_0 = 0...8$ 

Решение в геометрически линейной постановке [3—5] может быть получено, если полагать в соответствующих формулах  $w_0 = 0$ .

Таким образом, получено аналитическое решение физически и геометрически нелинейной краевой задачи в параметрическом виде, которое имеет самостоятельное прикладное значение и может быть использовано для тестирования численных результатов на основе более сложных упругопластических моделей с использованием реальной диаграммы деформирования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Ерхов М. И., Старов А. В.* Большие прогибы круглых идеально пластических пластинок при локальном нагружении // Строительная механика и расчет сооружений. 1988. № 6. С. 15—20.
- 2. Гопкинс  $\Gamma$ ., Прагер B. Несущая способность круглых пластинок // Механика: сб. переводов. 1955. № 3. С. 100—111.
- 3. *Шапиро Г. С.* Упругопластический изгиб круглой пластинки и существование жесткопластической задачи // Известия АН СССР, Отделение технических наук, механики и машиностроения. 1961. № 2.
- 4. *Zaid M*. On the carrying capacity of plates of arbitrary shape and variable fixity under a concentrated load // Journal of Applied Mechanics. 25. 1958. P. 598—602.
- 5. Schumann W. On limit analysis of plates // Quarterly of Applied Mathematics. 16. 1958. P. 16—71.
  - 6. Ерхов М. И. Теория идеально-пластических тел и конструкций. М.: Наука, 1978. 352 с.
- 1. *Erkhov M. I., Starov A. V.* Bol'shie progiby kruglykh ideal'no plasticheskikh plastinok pri lokal'nom nagruzhenii // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. 1988. № 6. S. 15—20.
- 2. *Gopkins G., Prager V.* Nesushchaya sposobnost' kruglykh plastinok // Mekhanika: sb. perevodov. 1955. № 3. S. 100—111.
- 3. Shapiro G. S. Uprugoplasticheskiy izgib krugloy plastinki i sushchestvovanie zhestkoplasticheskoy zadachi // Izvestiya AN SSSR, Otdelenie tekhnicheskikh nauk, mekhaniki i mashinostroeniya. 1961. № 2.

- 4. Zaid M. On the carrying capacity of plates of arbitrary shape and variable fixity under a concentrated load // Journal of Applied Mechanics. 25. 1958. P. 598—602.
- 5. Schumann W. On limit analysis of plates // Quarterly of Applied Mathematics. 16. 1958. P. 16-71.
  - 6. Erkhov M. I. Teoriya ideal'no-plasticheskikh tel i konstruktsiy. M.: Nauka, 1978. 352 s.

© Старов А. В., 2014

# Поступила в редакцию в апреле 2014 г.

### Ссылка для цитирования:

Старов А. В. Пластическое деформирование круглых пластинок с шарнирным опиранием края при локальном нагружении жестким штампом // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 133—140.

УДК 691

### Г.Г.Шкода

# СТАДИИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Рассмотрены условия работы фибр в бетонной матрице сталефибробетона. Показана модель разрушения, получены формулы прочности сталефибробетона при осевом растяжении, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными автора и других исследователей.

К л ю ч е в ы е  $\,$  с л о в а  $\,$ : сталефибробетон, работа фибр, модель разрушения, осевое растяжение.

The conditions of work of fibers in the concrete matrix of steel fiber concrete are discussed. The failure model is shown, the strength formulas of steel fiber concrete with axial tension, which correspond to the experimental data received by the author and other researchers, are obtained.

Key words: steel fiber concrete, work of fiber, failure model, axial tension.

В настоящее время нет стройной теории, позволяющей широко прогнозировать свойства сталефибробетона. Теоретическое рассмотрение вопросов прочности и напряженного состояния таких композиционных материалов следует проводить на структурной основе в рамках механики разрушения хрупких материалов. За основные структурные характеристики приняты:  $n_1$  — количество фибр, пересекающих единицу площади поперечного сечения; S — среднее расстояние между фибрами; l/d — отношение длины фибры l к ее диаметру d;  $K_{\rm o}$  — ффициент ориентации фибр;  $K_{\rm s}$  — коэффициент заделки фибр. Учитывается также влияние границ поперечного сечения — npucmehhbu эффект [1].

Ранее были рассмотрены условия работы фибр в бетонной матрице [2], влияющие на процессы выдергивания фибры из бетона, разрыва фибры в предельном состоянии, а также условия, возникающие при взаимодействии фибр с бетоном, влияющие на процесс выдергивания или разрыва фибр.

**Условия выдергивания фибры из бетона.** Максимально возможной длиной заделки фибры является длина l/2. Обозначим  $\tau_{\rm cq}$  — среднее нормативное напряжение сцепления поверхности фибры с бетоном. Возможны два случая:  $\tau_{\rm cq} > R_{\rm cp}^{\rm H}$  и  $\tau_{\rm cq} < R_{\rm cp}^{\rm H}$ . Если нормативная прочность бетона на срез  $R_{\rm cp}^{\rm H} < \tau_{\rm cq}$ , то разрушаться в первую очередь будет не сцепление, а бетон, и фибра будет выдергиваться вместе со слоем прилегающего к ее поверхности бетона.

Проанализируем вероятность первого случая. При гладкой поверхности арматуры и бетонах с  $R \le 20$  МПа среднее значение  $R_{\rm cll}$  составляет величину от 2,5 до 4,0 МПа. При фибрах с периодическим профилем эта величина больше примерно в 2 раза. Кроме того, с увеличением марки бетона R очевидно будет увеличиваться и  $R_{\rm cll}$ . Обычно принимают  $R_{\rm cll}$  / R = 0,19, а нормативную прочность бетона на срез принимают  $R_{\rm cll}^{\rm H} = 2R_{\rm p}^{\rm H}$  ( $R_{\rm cp}^{\rm H}$  — нормативная прочность бетона на растяжение). Например, для бетона марки 300:  $R_{\rm cll}^{\rm H} = 2 \cdot 2, 1 = 4,2$  МПа, что меньше, чем  $R_{\rm cll} = 30 \cdot 0, 19 = 5,7$  МПа.

При меньших марках бетона разница еще бо́льшая. Поэтому выдергивание фибр из бетона при расчете должно приниматься не по поверхности сцепления, а по срезу бетона. В то же время заметим, что фактически в эксперименте некоторое количество фибр может разорваться по следующим причинам:

концы фибр могут иметь заанкеривание вследствие искривления их при изготовлении и укладке сталефибробетонной смеси;

прочность бетона на срез может иметь величину, большую  $R_{\rm cp}^{\rm H}$ . Если прочность бетона на срез  $R_{\rm cp}^{\rm H} > \tau_{\rm cq}$ , то формально возможно «чистое» выдергивание фибры из бетона. Однако такое выдергивание все равно маловероятно вследствие неоднородности свойств бетона. При периодическом профиле фибры сама периодичность будет обусловливать срез.

**Условия разрыва фибры в предельном состоянии.** Согласно рассмотренным условиям выдергивания фибры из бетона, фибра должна выдернуться со слоем бетона, если прочность фибры на разрыв больше, чем прочность на выдергивание, то есть

$$\frac{l}{2}\pi d2R_{\rm p}^{\rm H} < \frac{\pi d^4}{4}R_{\rm a}^{\rm H}.\tag{1}$$

Здесь  $R_{\rm a}^{\rm H}$  — нормативное сопротивление арматуры.

Решая неравенство (1) относительно l/d , получим условие выдергивания фибры:

$$\frac{l}{d} < 0.25 \frac{R_{\rm a}^{\rm H}}{R_{\rm p}^{\rm H}}.\tag{2}$$

Для l/d=100 и марки бетона 300 для обеспечения этого условия достаточно, чтобы было  $R_{\rm a}^{\rm H}>4R_{\rm cp}^{\rm H}\frac{l}{d}=4\cdot 2,1\cdot 100=840\,$  МПа. Фибры могут разрываться в предельном состоянии, если

$$\frac{l}{d} > 0.25 \frac{R_{\rm a}^{\rm H}}{R_{\rm p}^{\rm H}}.$$
 (3)

Заметим, что в опыте картина работы фибр может быть несколько смазана, вследствие того, что разрушающими значениями могут быть не нормативные, а ме́ньшие или бо́льшие сопротивления бетона и стали, которые обусловлены неоднородностью их свойств.

Из условия (1), заменив l/2 на  $l_3$  ( $l_3$  — необходимая глубина заделки фибры, которая, очевидно, может быть меньше l/2), получим:

$$l_3 > 0.125 d \frac{R_{\rm a}^{\rm H}}{R_{\rm p}^{\rm H}}.$$
 (4)

Условия, возникающие при взаимодействии фибр с бетоном, влияющие на процесс выдергивания или разрыва фибр. Образование микротрещин в матрице определяется ее прочностью на растяжение.

В первую очередь микротрещины будут, очевидно, возникать в местах концентрации напряжений, там, где главные растягивающие напряжения будут иметь максимальную величину.

Поскольку усилие на фибру передается через бетон, максимальные нормальные напряжения в бетоне будут у концов фибр, где бетон работает один без помощи фибр. В этих же местах будут максимальными и касательные напряжения, обусловливаемые локальным действием фибр, сдерживающих продольные деформации в непосредственной близости от себя.

Вследствие комбинированного действия нормальных и касательных напряжений главные растягивающие напряжения действуют у концов фибр под углом к их оси, что должно вызвать образование микротрещин, имеющих наклон от конца фибры в сторону ее середины. При наличии смежных фибр, работающих в противоположном направлении, наклонное положение трещин обусловливает образование «бетонных раскосов», вызывающих распорное действие. Распор вызывает обжатие бетона в поперечном направлении, что должно увеличить  $\tau_{cq}$  за счет повышения трения. Увеличение  $\tau_{cq}$  для прочности сталефибробетона значения не имеет, так как силы сцепления и так имеют величину бо́льшую, чем несущая способность бетона на срез. Обжатие бетона полезно, так как оно увеличивает сопротивление бетона срезу, особенно вблизи поверхности фибры. Поскольку обжатие вблизи поверхности фибры все равно будет значительно бо́льшим, чем в середине расстояния между фибрами, поверхность разрушения по срезу должна отстоять от фибры на некотором расстоянии.

Стадии напряженного состояния сталефибробетона при растяжении. В теории железобетона стадиями называются состояния, соответствующие определенной степени нагружения и имеющие специфические, качественные отличия друг от друга.

К первой начальной стадии напряженного состояния сталефибробетона при растяжении следует отнести состояние, при котором в бетонной матрице не возникает дефектов, связанных с действием нагрузки. Имевшиеся до нагружения микротрещины, образовавшиеся вследствие различных причин, связанных с технологией изготовления, на этой стадии не получают развития. Очевидно, что сталефибробетон в таких условиях работает как единый материал, преимущественно в упругой области.

Вторая, эксплуатационная стадия характеризуется наличием новых микротрещин, возникающих в местах концентрации растягивающих напряжений.

Вследствие того, что фибры «плавают» в бетоне и нагрузка на них передается не непосредственно, а через бетонную матрицу, главные растягивающие напряжения имеют наибольшую величину вблизи концов фибр и направлены под углом к их оси. Направление ожидаемых микротрещин показано на рис. 1 волнистыми линиями.

Поскольку ориентация фибр является произвольной, эти микротрещины имеют хаотическое, случайное направление. Микротрещин возникает много, но ориентированных по-разному, в соответствии с ориентацией фибр (рис. 2). Это затрудняет их развитие и слияние, отдаляет появление сквозной магистральной трещины и расширяет диапазон действия второй стадии.

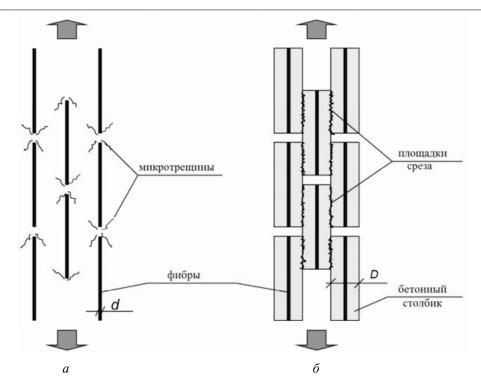


Рис. 1. Предполагаемое направление микротрещин

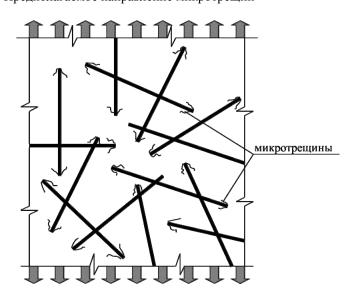


Рис. 2. Ориентация фибр

Напряженное состояние во второй стадии вследствие наличия множества по-разному ориентированных дефектов (в местах микротрещин) является весьма сложным, но в то же время и благоприятным для матрицы. Микротрещины, имеющие различную ориентацию и «прошитые» в разных направлениях соседними фибрами, затрудняют развитие друг друга и развитие микротрещин, имевшихся до нагружения. Вследствие этого объединение микротрещин

в одну магистральную возможно только путем среза бетона в промежутках между фибрами. Отметим также, что вследствие неоднородности бетона микротрещины должны возникать не сразу во всех местах концентрации напряжений (не у всех концов фибр), а только в тех местах, где прочность бетона на растяжение окажется наименьшей и там, где концентрация напряжений будет совпадать с общим направлением силового потока. С ростом нагрузки будет возникать все большее и большее количество микротрещин.

На основе изложенной выше гипотезы образования и развития микротрещин можно предложить следующую оценку несущей способности сталефибробетона во второй стадии.

Рассмотрим схематичную модель второй стадии, условно приняв положение фибр параллельным друг другу (рис. 1, а). У концов фибр на рисунке показаны микротрещины. На рис. 1,  $\delta$  показано положение предполагаемых площадок среза. Произвольную ориентацию учтем коэффициентом ориентации  $K_0$ . Будем полагать, что срез происходит по цилиндрической поверхности объема бетона, приходящегося на одну фибру (рис. 1, б). Диаметр цилиндрического столбика, очевидно, максимально будет равен S — среднему рас-

стоянию между фибрами.  $S = \sqrt{\frac{1}{n_1}}$  [3]. Общая площадь среза на 1 см² попе-

речного сечения:

$$F_{\rm cp} = m \frac{l}{2} \pi S n_{\rm l},\tag{5}$$

где  $\pi S$  — периметр бетонного столбика; m — эмпирический коэффициент, введен для учета вероятности уменьшения длины площадок среза вследствие неравного деления длины фибр, попавших в магистральную трещину между образовавшимися частями образца после разрыва (вероятность — 0,5), а также для учета вероятностной величины диаметра цилиндрической поверхности среза, который в среднем может быть меньше S. Этот коэффициент принят равным m = 0.15. Несущая способность сталефибробетона на растяжение

$$\sigma_{\phi\delta p} = \tau F_{cp} K_{o}$$

или, с учетом (5):

$$\sigma_{\phi\delta p} = \tau m \frac{l}{2} \pi \sqrt{\frac{1}{n_1}} n_1 K_o. \tag{6}$$

Заменяя  $n_1 = \frac{2\mu}{\pi d^2}$  ( $\mu$  — объемный процент армирования), получим окончательно для второй стадии:

$$\sigma_{\phi\delta p} = 0.188\tau \frac{l}{d} \sqrt{\mu} K_{o}. \tag{7}$$

Третья, разрушающая стадия наступает тогда, когда в предельном состоянии

$$\tau \to R_{\rm cp}^{\scriptscriptstyle 
m H} \cong 2R_{\rm p}^{\scriptscriptstyle 
m H}$$
.

Тогда для разрушающей третьей стадии нормативное сопротивление сталефибробетона на растяжение

$$R_{\phi \delta p} = 0.375 R_{\rm p}^{\rm H} \frac{l}{d} \sqrt{\mu} K_{\rm o}.$$
 (8)

Разрушение, соответствующее формуле (8), возможно при условии, что несущая способность по срезу бетона будет меньше, чем несущая способность по выдергиванию или разрыву фибр:

$$m\pi S \frac{l}{2} \sigma R_{\rm cp}^{\scriptscriptstyle \mathrm{H}} < \pi d \frac{l}{2} \tau_{\rm cu}.$$

Решая это уравнение относительно S, принимая  $R_{\rm cp}^{\rm H}\cong 2R_{\rm p}^{\rm H}$  и m=0,15, получим:

например, при  $\tau_{\text{сц}} = 6$  МПа,  $R_{\text{p}}^{\text{H}} = 1,6$  МПа (марка бетона 200), d = 0,025 см:

$$S < 3,333 \frac{6}{1.6} 0,025 = 0,312 \text{ cm}.$$

Такое расстояние соответствует коэффициенту армирования:

$$\mu < \left(\frac{1,25d}{S}\right)^2 = \left(\frac{1,25 \cdot 0,025}{0,312}\right) = 0,010; \ \mu > 1 \%.$$

Этот расчет получен на основании зависимости  $S=1,25d\sqrt{\frac{1}{\mu}}$  [3].

Уравнение (8) может быть выражено через S — среднее расстояние между фибрами. Учитывая, что  $S=1,25d\sqrt{\frac{1}{\mu}}$  [3] и выражая d через S, получим:

$$R_{\phi\delta p}^{H} = 0.470 R_{p}^{H} \frac{l}{S} K_{o}.$$
 (9)

На рис. 3 приведены кривые зависимости коэффициента эффективности от процента армирования при отношениях  $\frac{l}{d}$  = 70;  $\frac{l}{d}$  = 100;  $\frac{l}{d}$  = 125. Коэффициент эффективности (отношение предельных прочностей) находится из отношений  $R_{\rm dop}^{\rm H}/R_{\rm p}^{\rm H}$ .

Из графика видно, что сходимость полученных теоретических кривых, построенных по формуле (8), с экспериментальными данными весьма хорошая. Известное несовпадение, вызывающее разброс точек, как нам представляется, зависит от технологических особенностей изготовления образцов, а также от масштабного фактора. Так, например, Д. Аболиньшем и др. [4] изготовлялись образцы малого размера, где неизбежно сказывался пристенный эффект, что вызывало некоторое увеличение прочности. Наоборот, снижение прочности, например у В. Рыбасова [5], может быть объяснено малым

B/II=0,4, что при армировании свыше 1 % приводило к недостаточно удобоукладываемой сталефибробетонной смеси, к неравномерности распределения фибр в бетонной матрице и к ухудшению сцепления фибр с бетоном вследствие островного характера их связи. Существенным образом влияет на прочность и параметр l/d. Известно, что оптимальным является отношение не менее 100.

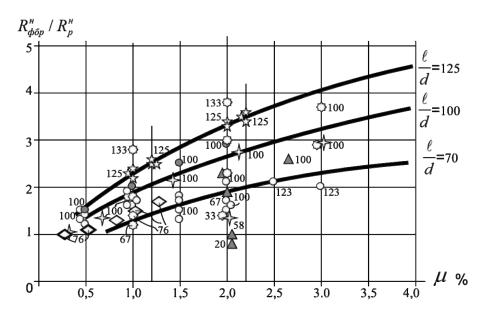


Рис. 3. Кривые зависимости коэффициента эффективности от процента армирования: экспертные данные:  $\bigstar$  — автора;  $\blacksquare$  — А. Куликова [4];  $\stackrel{\frown}{\hookrightarrow}$  — Д. Аболиньша и др. [5];  $\stackrel{\frown}{\hookrightarrow}$  — В. Рыбасова [6];  $\stackrel{\blacktriangle}{\blacktriangle}$  — J. Romualdi and J. Mandel [7];  $\stackrel{\bigstar}{\diamondsuit}$  — S. Shah and B. Rangan;  $\stackrel{\bigstar}{\leadsto}$  — М. Snayder and D. Lankard [9]; цифрами около точек показаны l/d

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Шкода  $\Gamma$ .  $\Gamma$  Технология учета пристенного эффекта в сталефибробетоне // Эффективные строительные конструкции: теория и практика: сб. ст. Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. Пенза, 2008. С. 79—82.
- 2. Шкода Г. Г. Условия работы фибр в бетонной матрице сталефибробетона // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона: материалы Международной науч.-практ. конф. Саратов, 2013. С. 105—109.
- 3. Шкода  $\Gamma$ .  $\Gamma$ . О некоторых структурных характеристиках фибробетона // Надежность и долговечность строительных конструкций: сб. ст. Волгоградского политехнического института. Волгоград, 1974. С. 142—144.
- 4. *Павлов А. П., Куликов А. Н.* Экспериментальные исследования фибробетона при центральном растяжении // Совершенствование методов расчета и исследование новых типов железобетонных конструкций. Ленинград, 1975. С. 9—17.
- 5. *Аболиньш Д. С., Кравинскис В. К., Лагутина Г. Е.* Мелкозернистый бетон, армированный обрезками проволоки // Бетон и железобетон. 1973. № 5.
- 6. *Рыбасов В. П.* К оценке прочности фибробетона // Фибробетон и его применение в строительстве: сб. ст. НИИЖБ ГОССТРОЯ СССР. М., 1979. С. 125—130.
- 7. Romualdi J. P., Mandel J. A. Tensili Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement // ACJ. 1964. №6.
  - 8. Shah S. P., Rangan B.V. Fiber Reiforced Concrete Properties // ACJ. 1971. № 2.
- 9. Snyder M. J., Lankard D. R. Factors Affecting the Flexural Strength of Steel Fibrous Concrete // ACJ. 1972.  $N_2$  2.

- 1. *Shkoda G. G.* Tekhnologiya ucheta pristennogo effekta v stalefibrobetone // Effektivnye stroitel'nye konstruktsii: teoriya i praktika: sb. st. Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta arkhitektury i stroitel'stva. Penza, 2008. S. 79—82.
- 2. *Shkoda G. G.* Usloviya raboty fibr v betonnoy matritse stalefibrobetona // Resursoenergoeffektivnye tekhnologii v stroitel'nom komplekse regiona: materialy Mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. Saratov, 2013. S. 105—109.
- 3. *Shkoda G. G.* O nekotorykh strukturnykh kharakteristikakh fibrobetona // Nadezhnost' i dolgovechnost' stroitel'nykh konstruktsiy: sb. st. Volgogradskogo politekhnicheskogo instituta. Volgograd, 1974. S. 142—144.
- 4. *Pavlov A. P., Kulikov A. N.* Eksperimental'nye issledovaniya fibrobetona pri tsentral'nom rastyazhenii // Sovershenstvovanie metodov rascheta i issledovanie novykh tipov zhelezobetonnykh konstruktsiy. Leningrad, 1975. S. 9—17.
- 5. *Abolin'sh D. S., Kravinskis V. K., Lagutina G. E.* Melkozernistyy beton, armirovannyy obrezkami provoloki // Beton i zhelezobeton. 1973. № 5.
- 6. *Rybasov V. P.* K otsenke prochnosti fibrobetona // Fibrobeton i ego primenenie v stroitel'stve: sb. st. NIIZhB GOSSTROYa SSSR. M., 1979. S. 125—130.
- 7. Romualdi J. P., Mandel J. A. Tensili Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement // ACJ. 1964. №6.
  - 8. Shah S. P., Rangan B.V. Fiber Reiforced Concrete Properties // ACJ. 1971. № 2.
- 9. Snyder M. J., Lankard D. R. Factors Affecting the Flexural Strength of Steel Fibrous Concrete // ACJ. 1972. No 2.

© Шкода Г. Г., 2014

Поступила в редакцию в феврале 2014 г.

### Ссылка для цитирования:

*Шкода Г. Г.* Стадии напряженного состояния сталефибробетона при растяжении // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 141—148.

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

УДК 625.731-047.43

#### А. С. Любченко

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ СОДЕРЖАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ РОССИИ С УЧЕТОМ ОПЫТА ГЕРМАНИИ

Приведено сравнение методов оценки состояния дорожных одежд России и Германии, описана система планирования содержания автомобильных дорог Германии и исследована возможность использования германской методики прогнозирования надежности дорожных одежд для российских условий.

К л ю ч е в ы е с л о в а: оценка состояния дорожных одежд, прогнозирование надежности дорожных одежд, система планирования содержания автомобильных дорог.

The article gives the comparison of methods for assessing the state of pavements in Russia and Germany, describes the system for planning the maintenance of highways in Germany and studies the possibility of using the German technique of forecasting the reliability of pavements for Russian conditions.

K e y w o r d s: assessment of road pavement, prediction of road pavements reliability, system of planning of road maintenance.

В настоящее время в России остро стоит проблема несоответствия нормативных (расчетных) сроков службы дорожных конструкций фактическим. Дорожные одежды под действием возрастающих с каждым годом нагрузок, на которые они не были первоначально рассчитаны, буквально «не доживают» до срока планируемого ремонта. В связи с этим программа ремонта и содержания дорог не может опираться только на заданные межремонтные сроки, а должна учитывать фактическое состояние дорог. Нормативный документ «Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог (ОДН 218.0.006-02)» регламентирует периодичность и порядок проведения работ при обследованиях дорог, однако он распространяет свое действие только на дороги общего пользования и не может быть применен для городских условий, где проблема планирования ремонтов стоит наиболее остро. При этом в нормативах не предусмотрена реализация прогнозирования состояния дорог, которая могла бы значительно сократить расходы на диагностику автомобильных дорог за счет отсутствия необходимости их частых обследований: так, например, диагностику магистральных дорог по основным критериям надежности (прочность, ровность, сцепление колеса с покрытием) по [1] необходимо проводить каждый год.

В связи с этим считаем целесообразной разработку системы планирования содержания дорог на основе оценки и прогнозирования их состояния, которая могла бы применяться как для дорог общего пользования, так и для городских дорог.

В ряде зарубежных стран уже накоплен немалый опыт по данному вопросу, поэтому научные исследования автора были направлены на изучение зарубежного опыта и сопоставление реализуемых за рубежом программ с российскими. В частности, большой интерес представила система планирования содержания автомобильных дорог, базируемая на оценке и прогнозировании их качества, реализуемая в Германии. Программа была разработана в 1999 г. и с тех пор постоянно совершенствовалась. В настоящий момент она представляет собой мощную систему менеджмента автомобильных дорог (рис. 1).

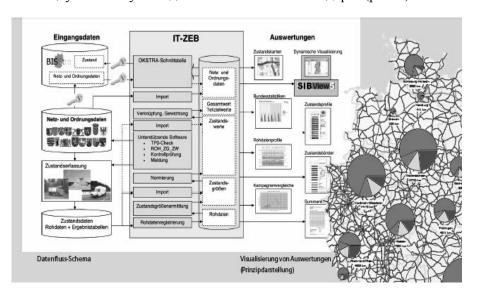


Рис. 1. Система менеджмента автомобильных дорог Германии

Общий алгоритм работы системы представляет собой цикл, состоящий из отдельных блоков, по сбору и анализу данных о состоянии, планировании и реализации работ по содержанию и ремонту автомобильных дорог (рис. 2).



Рис. 2. Общий алгоритм работы системы менеджмента автомобильных дорог

Для изучения системы содержания автомобильных дорог Германии доц. А. С. Любченко была пройдена научная стажировка в Высшей профессиональной школе г. Кёльна, Германия (Fachhochschule Koeln, Deutschland) под руководством

профессора Карстена Коха (Prof. Dr.-Inj. Carsten Koch, Fakultät für Bauingenieurwesen und Umwelttechnik) в рамках совместной программы Министерства образования и науки РФ и Германской службы академических обменов (ДААД).

При прохождении стажировки были поставлены следующие задачи:

изучить реализуемые в Германии при оценке надежности дорожных одежд методы и средства и сравнить их с используемыми в России;

ознакомиться с действующими в Германии нормативными документами, регламентирующими порядок оценки и прогнозирования надежности дорожных одежд;

исследовать возможности прогнозирования изменения состояния дорожных конструкций в процессе эксплуатации автомобильных дорог и соответствующего планирования их содержания.

При изучении методов и средств, используемых для оценки состояния автомобильных дорог в Германии, было отмечено, что в большинстве своем они аналогичны российским, а основными показателями качества дорожных одежд как в Германии, так и в России являются ровность покрытия, прочность конструкции и сцепление колеса автомобиля с покрытием [2]. Как правило, диагностику дорог осуществляют автоматизированные передвижные дорожные лаборатории (рис. 3) с установленным на них дополнительным оборудованием. Однако в России вследствие большой стоимости такого оборудования зачастую все еще используют неавтоматизированные средства измерений, такие как трехметровые рейки, приборы ППК для оценки сцепных качеств покрытия, прогибомеры.

В России после измерений показателей ровности, прочности и сцепления их оценивают, сравнивая с нормативными значениями, после чего делается вывод об удовлетворении необходимым требованиям. В Германии же оценку показателей производят путем перевода в безразмерные показатели (баллы) (рис. 4), а затем с учетом влияния каждого показателя определяют общий показатель качества (Gesamtwert) (рис. 5).

Отметим здесь, что в Германии показатель прочности как таковой не нормируется, а учитывается опосредованно через глубину колеи и ровность. Замеры прочности производят, как правило, в исследовательских целях. При этом в определении общего показателя качества (надежности) участвует также так называемая «фиктивная глубина воды», т. е. глубина воды в колее при существующем поперечном уклоне. Этот параметр является относительным показателем опасности возникновения аквапланирования.

Получаемый в итоге общий показатель качества соотносится с сигнальным (3,5 балла) и предельным (4,5 балла) значениями. Затем составляются карты состояния дорог, на которых для наглядности участки со значениями, выходящими за нормируемые пределы, показаны разными цветами (рис. 6). Далее производится анализ полученной картины, устанавливаются границы характерных по состоянию участков дорог и принимается программа ремонта автомобильной дороги.

Кроме оценки существующего положения, программа содержания дорог Германии IT-ZEB в обязательном порядке включает прогнозирование состояния дорог, на основе которого осуществляется планирование ремонтных мероприятий на несколько лет вперед путем выбора оптимальной программы содержания.

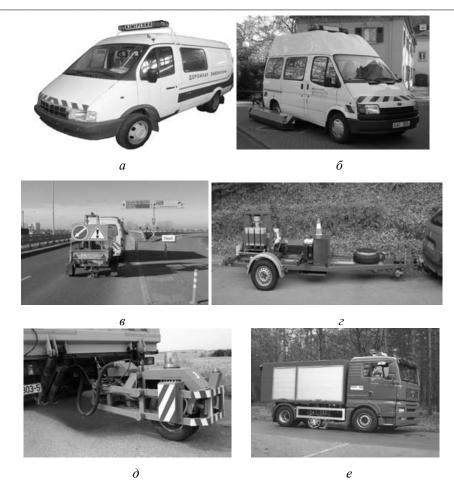


Рис. 3. Средства и оборудование для оценки состояния дорог: a — ходовая лаборатория для измерения ровности при помощи толчкомера, используемая в России;  $\delta$  — германская система контроля ровности KARGUS; передвижная лаборатория с установкой ПКРС-2У;  $\epsilon$  — российская установка динамического нагружения ДИНА-3М для оценки прочности;  $\epsilon$  — применяемая в Германии система динамического нагружения Falling-Weight-Deflector;  $\delta$  — передвижная лаборатория с установкой ПКРС-2У, применяемая в России для оценки сцепных свойств покрытий;  $\epsilon$  — передвижная лаборатория для определения коэффициента сцепления колеса автомобиля с покрытием дороги в Германии

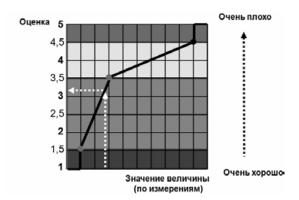


Рис. 4. Схема перевода показателей состояния дорог в балльную систему

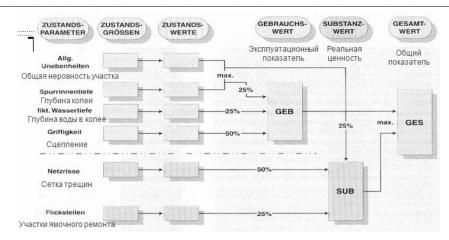


Рис. 5. Определение общего показателя состояния дорожной одежды

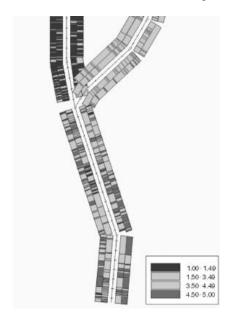


Рис. 6. Пример карты состояния участка автомобильной дороги в Германии

В России, к сожалению, в настоящий момент нет принятой и утвержденной в нормативах методики прогнозирования состояния дорожных покрытий и планирования ремонтных мероприятий, что приводит к увеличению затрат на оценку состояния автомобильных дорог (для дорог общего пользования), их восстановление, а также затрат пользователей дорог. Однако многие российские исследователи, в том числе автор статьи, работают над разработкой такой методики.

Исследования автора посвящены в большей части прогнозированию ровности дорожного покрытия как одного из основных показателей, характеризующих удобство движения по дороге и оказывающих решающее влияние на скорость движения автомобилей и транспортную работу дороги в целом. Для выявления закономерностей изменения ровности в процессе эксплуатации дорожных покрытий автором был произведен анализ данных измерений

показателя ровности на автомобильных дорогах Казахстана за восьмилетний период. В результате была получена математическая модель, позволяющая прогнозировать изменение состояния дорожной одежды [3], что, в свою очередь, может являться основой для планирования восстановительных мероприятий на автомобильных дорогах.

Методика прогнозирования состояния дорожных одежд по критерию ровности, применяемая в Германии, основывается на анализе изменения непосредственно математического ожидания показателя ровности. Примечательно, что общий вид функции изменения математического ожидания ровности с течением времени, полученной автором [3], аналогичен используемой в нормативных документах Германии [4, 5]. В вопросе оценки и прогнозирования состояния дорожных одежд Германией накоплен большой опыт: многолетние наблюдения за состоянием, фиксация и анализ данных в программе IT-ZEВ позволили разработать применяемую в настоящее время методику прогнозирования надежности дорожных одежд и ввести ее в нормативы. В основу методики положен принцип разделения дорог по «классам поведения». Различают четыре «класса поведения» дорог: or Verhaltensklasse 1 (медленное разрушение) до Verhaltensklasse 4 (очень быстрое разрушение). С учетом измеренной величины, характеризующей состояние дороги (как правило, это показатели ровности, колейности и наличия трещин/повреждений), переведенной в баллы, зная время проведения последних ремонтных мероприятий, можно определить, к какому из четырех «классов поведения» относится дорога (рис. 7).

Для дальнейшего прогнозирования состояния дорог по одному из критериев уточняют параметры функции

$$ZW_{(t)} = 1 + at^b , (1)$$

где  $ZW_{(t)}$  — показатель состояния по выбранному критерию в баллах; t — время в годах; a, b — коэффициенты уравнения.

При этом сначала назначается коэффициент b по табл. в зависимости от выбранного параметра и «класса поведения дороги», а затем по формуле (2) определяется коэффициент a.

Значения коэффициентов а и b для различных классов поведения дорог

Verlauf $ZW_i(t) = 1 + a \cdot t^b$	Verhaltensklasse	Koeffizienten	Allgemeine Unebenheiten	Spurrinnen	Risse (und) Schäden
langsam	1	a	0,0060	0,2051	0,0000088
		b	1,6310	0,5850	3,5420000
mittel	2	a	0,0210	0,3520	0,0000356
		b	1,5510	0,6320	3,4190000
schnell	3	a	0,0577	0,5246	0,0004370
		b	1,4150	0,6660	3,0000000
sehr schnell	4	a	0,1685	0,8394	0,0051000
		b	1,3800	0,6781	2,6000000

$$a = \left(ZW_{(z)} - 1\right) / t_{(z)}^{b}. \tag{2}$$

После определения параметров функции становится возможным прогноз выхода показателя за сигнальное или предельное значения, что, в свою очередь, является основой для назначения ремонта или капитального ремонта автомобильной дороги.

При попытке автора применить данную методику прогнозирования в российских условиях (по данным обследований автомобильных дорог Казахстана) был получен новый «класс поведения» (Verhaltensklasse (VK) 5), характеризуемый по меркам Германии чрезмерно быстрым темпом разрушения (рис. 7). При этом экспериментальные данные с очень большой вероятностью были аппроксимированы зависимостью (1).

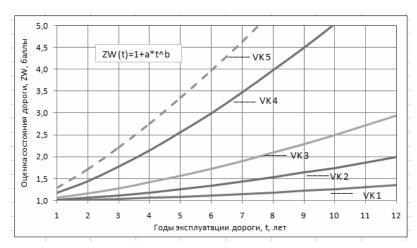


Рис. 7. Зависимость показателя состояния дорог от лет их эксплуатации для различных «классов поведения» (VK1 — VK5)

Таким образом, можно сделать вывод о пригодности методики, используемой в Германии при прогнозировании состояния дорожных одежд, для российских условий. Однако требуется выполнение более масштабных исследований для выделения различных «классов поведения» дорог для в значительной мере различных условий эксплуатации автомобильных дорог в России.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог: ОДН 218.0.006-02. М. : Информавотдор, 2002. 140 с.
- 2. Ремонт и содержание автомобильных дорог: справочная энциклопедия дорожника. Т. II / под ред. А. П. Васильева. М., 2004.
- 3. Любченко А. С. Рационализация сроков службы и проведения диагностики автомобильных дорог // Вестник Волгогр. гос. архит. строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 33(52). С. 126—130.
- 4. Empfehlungen für das Erhaltungsmanagement von Innerortsstraßen (E EMI 2012), FGSV, Köln, 2012.
- 5. Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen (RPE-Stra 01), FGSV, 2001.
- 1. Pravila diagnostiki i otsenki sostoyaniya avtomobil'nykh dorog: ODN 218.0.006-02. M. : Informavotdor, 2002.  $140 \, \mathrm{s}$ .
- 2. Remont i soderzhanie avtomobil'nykh dorog: spravochnaya entsiklopediya dorozhnika. T. II / pod red. A. P. Vasil'eva. M., 2004.

- 3. *Lyubchenko A. S.* Ratsionalizatsiya srokov sluzhby i provedeniya diagnostiki avtomobil'nykh dorog // Vestnik Vestnik Volgogr. gos. arkhit. stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2013. Vyp. 33(52). S. 126—130.
- 4. Empfehlungen für das Erhaltungsmanagement von Innerortsstraßen (E EMI 2012), FGSV, Köln, 2012.
- 5. Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen (RPE-Stra 01), FGSV, 2001.

© Любченко А. С., 2014

Поступила в редакцию в марте 2014 г.

### Ссылка для цитирования:

*Любченко А. С.* Совершенствование системы содержания автомобильных дорог России с учетом опыта Германии // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 149—156

УДК 656.025.2 (470.45)

### Е. Ю. Серова, Н. В. Сапожкова, В. В. Мельников

# АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ ПАССАЖИРОПОТОКОВ НА УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ ВОЛГОГРАДА

Приведены результаты исследования пассажиропотоков на внутригородских маршрутах г. Волгограда. Получены величины пассажиропотоков и их колебания в зависимости от времени суток.

Ключевые слова: пассажиропоток, улично-дорожная сеть, пассажирский транспорт, маршрут движения, внутригородские пассажирские маршруты.

The results of research on intercity passenger routes in Volgograd are provided. The values of passenger flow and its variations depending on the time of the day are received.

 $K\ e\ y\ w\ o\ r\ d\ s$ : passenger traffic, street and road network, passenger transport, route, intercity passenger routes.

Общественный пассажирский транспорт играет существенную роль в единой транспортной системе страны. Основными задачами субъектов, осуществляющих пассажирские перевозки, являются: полное удовлетворение потребностей населения в пассажирских автомобильных перевозках; обеспечение высокой культуры обслуживания пассажиров и безопасности перевозок; эффективное использование транспортных средств и максимальное снижение транспортных расходов; обобщение и распространение передовых методов работы [1].

Увеличение подвижности городского населения порождает целый ряд проблем, связанных с развитием транспорта в городах. Роль и значение работы городского пассажирского транспорта в условиях непрерывного роста городов, концентрации в них населения, роста насыщения транспортными средствами требуют проведения научных исследований, результаты которых позволяют осуществить мероприятия, направленные на совершенствование сети общественного транспорта [2]. В связи с повышением уровня автомобилизации и увеличением подвижности населения на фоне недостаточных темпов развития улично-дорожной сети остро стоит проблема оптимизации пассажирских перевозок, направленная на динамическую адаптацию их к постоянно меняющимся условиям.

Один из наиболее важных показателей, характеризующих работу городского пассажирского транспорта, — пассажиропоток, определяемый количеством пассажиров, которое проезжает в определенное время на заданном участке маршрута в одном направлении (любым видом транспорта), объемом перевозок пассажиров, то есть количеством пассажиров, перевозимых рассматриваемым видом транспорта за определенный промежуток времени (час, сутки, месяц, год) [1].

На сегодняшний день применяют три вида исследования пассажиропотоков: сплошное — на всей городской, пригородной и междугородней маршрутной сети не реже одного раза в три года; выборочное — на отдельных городских, пригородных и междугородных маршрутах не реже двух раз в год

(в осенне-зимний и весенне-летний периоды), а также при резком изменении пассажиропотоков; на вновь открытых маршрутах обследование проводится после трех-четырех месяцев регулярной работы автобусов.

Учитывая характерную особенность пассажиропотоков — их неравномерность, — необходимо выявлять изменение пассажиропотоков по времени (часам, суткам, дням недели, периодам года и т. д.), по участкам маршрута (перегонам) и направлениям маршрута. Однако особое внимание в этом вопросе следует уделить прогнозированию пассажиропотока по часам суток и дням недели, а также прогнозированию дорожных условий [3].

В 2013 г. в рамках выполнения хоздоговорной работы сотрудники и студенты ВолгГАСУ выполнили комплексное обследование пассажиропотоков на маршрутной сети общественного транспорта г. Волгограда [4]. Проведенные обследования позволили собрать объективную информацию для принятия обоснованных решений по повышению качества пассажирских перевозок, включающих вопросы совершенствования маршрутной сети, открытия новых, наиболее удобных для пассажиров маршрутов общественного транспорта; по изменению расписаний движения; использованию количества и вместимости подвижного состава, особенно в часы пик; по работе общественного транспорта в удобное для городского населения время. Кроме того, была поставлена цель собрать материал для решения задач прогнозирования пассажиропотоков, моделирования транспортной сети города и более эффективного управления движением общественного пассажирского транспорта, в том числе и в режиме реального времени, что является важной задачей оптимизации организации дорожного движения [3].

Обработка результатов экспериментальных наблюдений, осуществляемых на основе выборочного метода, требует использования методов теории вероятности и математической статистики [5].

Пассажиропоток — величина дискретная, она изменяется случайным образом, но в определенном среднем темпе. Такая величина описывается распределением Пуассона:

$$P_n(t) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^n}{n!}.$$
 (1)

Это уравнение показывает вероятность появления n событий, наступающих с интенсивностью  $\lambda$  в интервале времени (0, t), и широко применяется в теории транспортных потоков, исследовании явлений и процессов на транспорте.

Определяемая величина носит случайный характер, в связи с чем был принят уровень доверительной вероятности (надежности)  $B_i$ , равный 0,95, являющийся достаточным для определения значения пассажиропотоков с определенной степенью точности. Обычно доверительная вероятность  $B_i$  принимается в пределах 0,9...0,999, причем низший предел используют при ориентировочных расчетах, а высший — при подготовке окончательных рекомендаций.

Соответственно выбранному значению  $B_i$  установлен показатель надежности  $t_i$ , который составил 1,96.

В практике исследований дорожно-транспортных процессов обычно оперируют данными наблюдений, получаемыми с надежностью 0,90...0,95. Это означает, что значение исследуемого параметра будет получено с ошибкой не более 10...5 %.

Из курса математической статистики известно, что истинное значение измеряемой величины a с неизвестным законом распределения лежит в границах

$$\overline{a} \pm t_i \sigma(\overline{a}),$$
 (2)

где  $\overline{a}$  — статистическая оценка математического ожидания величины a;  $\sigma(\overline{a})$  — среднеквадратическое отклонение (ошибка измерения), определяемое как

$$\sigma(\bar{a}) = \frac{\sum \sigma(a)}{\sqrt{n}},\tag{3}$$

где  $\sigma(a)$  — среднеквадратическое отклонение измеряемой величины a; n — число измерений.

Распределение Пуассона характеризуется средним числом отсчетов  $\mu$ . Данное распределение со средним числом отсчетов  $\mu$  имеет стандартное отклонение

$$\sigma_{\Pi} = \sqrt{\mu}. \tag{4}$$

Относительная погрешность в этом случае

$$\delta_{\Pi} = \frac{1}{\sqrt{\mu}}.\tag{5}$$

При большом значении μ распределение Пуассона хорошо аппроксимируется функцией Гаусса [5]:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-x^2/2\sigma^2},\tag{6}$$

где  $x = X - \bar{x}$  представляет собой отклонение от среднего значения;  $\sigma$  — основное отклонение.

Следовательно, интервал, в котором расположено значение измеряемой величины (количество пассажиров), можно прогнозировать с учетом Гауссовского распределения.

$$\mu \pm t_i \sqrt{\mu}. \tag{7}$$

С учетом описанного выше математического подхода и на основе данных о количестве перевезенных пассажиров полученных экспериментальным методом наблюдения с вероятностью 0,95, были определены величины пассажиропотоков и интервалы, в которых лежат значения измеряемого показателя. Результаты исследования пассажиропотоков на улично-дорожной сети г. Волгограда на наиболее загруженных участках в утренний, дневной и вечерний периоды представлены в табл. [4].

Результаты исследования пассажиропотоков на участке улично-дорожной сети Волгограда по пр. В. И. Ленина и пр. Университетскому [4]

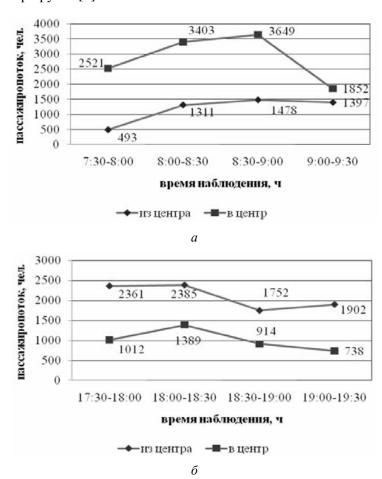
	•	•		•	•	•				
	Среднее количество пассажиров, перевезенных за два расчетных часа,									
Участок улично-	и ошибка среднего									
	Направ-	Переве- зенные	Ошиб-	Пере-	Ошиб-	Переве- зенные	Ошиб-			
	ление	пасса-	ка	везен-	ка	пасса-	ка			
дорож-	движе-	жиры в	сред-	ные пасса- жиры днем,	сред-	жиры в	сред-			
ной сети	ния	пиковые	него		него	пиковые	него			
	транс-	часы	(ин-		(ин-	часы	(ин-			
	порта	утром,	тервал)		тервал)	вечером,	тервал)			
	and P and	пас./ ч		пас./ ч		пас./ ч	F			
	Маршрутные такси									
	Из цен-									
	тра	2078	±89	2285	±94	3201	±111			
По пр.	В центр	3800	±121	2136	±91	2532	±99			
Ленина	Автобусы									
(ост.	Из цен-						2.5			
пл. Воз-	тра	92	±19	48	±14	172	±26			
рожде-	В центр	200	±28	96	±19	76	±17			
ния)	Электротранспорт									
	Из цен- тра	1411	±74	1700	±81	4932	±138			
	В центр	5538	±146	1927	±86	1388	±73			
-	Маршрутные такси									
По пр.	Из цен-	2641				1276	. 100			
Универ-	тра	3641	±118	3405	±114	4276	±128			
ситет-	В центр	6332	±156	4610	±133	4654	±134			
скому (ост. ВГ СХА)	Автобусы									
	Из цен- тра	813	±56	637	±49	1180	±67			
	В центр	1975	±87	784	±55	518	±45			

Анализ распределения количества перевезенных пассажиров в течение двух часов наблюдения показал, что наибольшая величина пассажиропотока приходится на период времени с 8.00 до 9.00 часов утром и с 17.30 до 18.30 вечером. На рис. представлено распределение пассажиропотоков в утренний и вечерний часы пик [4].

В целом анализ полученных результатов обследования пассажиропотоков на улично-дорожной сети г. Волгограда позволяет сделать следующие выводы:

- 1. В большинстве случаев значения пассажиропотоков для утреннего или вечернего часа пик превышают значения пассажиропотоков в межпиковый период.
- 2. Отмечено характерное смещение максимальных значений пассажиропотоков в сторону утреннего или вечернего часа пик в зависимости от величины транспортных корреспонденций в утренний или вечерний периоды соответственно.
- 3. В среднем распределение количества перевезенных пассажиров на исследованных маршрутах по видам транспорта следующее: электротранспорт (трамваи, троллейбусы) 19 %; автобусы 15 %; маршрутные такси 66 %.

- 4. Интервалы движения транспортных средств, осуществляющих движение по обследованным маршрутам, не соответствуют нормативным требованиям у 53 % маршрутных такси, у 100 % маршрутов автобусов и у 44 % маршрутов электротранспорта.
- 5. Существенна неравномерность движения транспортных средств на отдельных маршрутах [4].



Распределение количества перевезенных пассажиров за время наблюдения по пр. В. И. Ленина в районе остановочного пункта «пл. Возрождения» по направлению из центра и в центр: a — в утренние часы;  $\delta$  — в вечерние часы

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Ларин О. Н. Организация пассажирских перевозок. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. 104 с.
- 2. Клинковитейн Г. И., Афанасьев М. Б. Организация дорожного движения. М. : Транспорт, 1997. 232 с.
- 3. *Юрченко П. И., Ильин Е. П., Замятин В. И.* Автоматизация статистического исследования пассажиропотоков маршрутной сети общественного транспорта в г. Барнауле // Ползуновский альманах. 2010. № 2. С. 42—44.
- 4. Отчет о НИР «Обследование пассажиропотоков на маршрутной сети общественного транспорта г. Волгограда». Волгоград : ВолгГАСУ, 2013. 154 с.
- 5. *Кремер Н. Ш.* Теория вероятности и математическая статистика: учеб. для вузов по экон. специальностям. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 573 с.

- 1. Larin O. N. Organizatsiya passazhirskikh perevozok. Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGU, 2005. 104 s.
- 2. Klinkovshteyn G. I., Afanas'ev M. B. Organizatsiya dorozhnogo dvizheniya. M.: Transport, 1997. 232 s.
- 3. Yurchenko P. I., Il'in E. P., Zamyatin V. I. Avtomatizatsiya statisticheskogo issledovaniya passazhiropotokov marshrutnoy seti obshchestvennogo transporta v g. Barnaule // Polzunovskiy al'manakh. 2010. N2. S. 42—44.
- 4. Otchet o NIR «Obsledovanie passazhiropotokov na marshrutnoy seti obshchestvennogo transporta g. Volgograda». Volgograd : VolgGASU, 2013. 154 s.
- 5. Kremer N. Sh. Teoriya veroyatnosti i matematicheskaya statistika: ucheb. dlya vuzov po ekon. spetsial'nostyam. M.: YuNITI-DANA, 2004. 573 s.

© Серова Е. Ю., Сапожкова Н. В., Мельников В. В., 2014

Поступила в редакцию в феврале 2014 г.

### Ссылка для цитирования:

Серова Е. Ю., Сапожкова Н. В., Мельников В. В. Анализ формирования пассажиропотоков на улично-дорожной сети Волгограда // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер. : Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 157—162.

УДК 502:656.025.2

### Е. Ю. Серова, Н. В. Сапожкова, В. В. Мельников

# ПРОБЛЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА В ВОЛГОГРАДЕ

Рассмотрены основные проблемы городского пассажирского транспорта и его влияние на процесс дорожного движения и экологическую безопасность окружающей среды. Приведены результаты исследования организации работы маршрутов общественного транспорта г. Волгограда. Определены основные направления совершенствования организации пассажирских перевозок общественным транспортом.

K л ю ч е в ы е с л о в а: пассажирский транспорт, маршрут движения, улично-дорожная сеть, безопасность дорожного движения, экологическая безопасность.

The main problems of urban passenger transport and its influence on the process of traffic and environmental safety are studied. The results of the research of the organization of public transport work in Volgograd are provided. The basic directions for the improvement of the organization of public passenger transport are determined.

K e y w o r d s: passenger transport, route, street and road network, road safety, environmental safety.

К основным задачам совершенствования организации дорожного движения в городах можно отнести увеличение пропускной способности улично-дорожной сети, снижение аварийности, повышение экологической безопасности.

На сегодняшний день значимой для организации дорожного движения на улично-дорожной сети городов является четкая организация пассажирских перевозок и безопасное движение общественного транспорта по маршрутам. Эффективность, комфортность и безопасность перевозок зависит, с одной стороны, от уровня их организации пассажирскими транспортными предприятиями, а с другой стороны — от уровня организации движения на городской дорожной сети [1]. В свою очередь, общественный пассажирский транспорт, как правило не имеющий изолированных путей сообщения, существенно влияет на состояние транспортных потоков и уровень удобства движения.

Кроме того, развитие пассажирского транспорта и улучшение транспортного обслуживания населения имеет большое социально-экономическое значение. Рациональная организация сети маршрутов пассажирского транспорта, оптимальное количество транспортных средств призваны обеспечить минимальные затраты времени на передвижение, комфортабельность поездки и удобство пользования транспортом. Необходимы такие системы организации движения, которые обеспечивали бы максимальное количество пассажироперевозок при минимальных затратах транспортного времени населения, минимальной себестоимости, высокий уровень безопасности в условиях растущего уровня автомобилизации.

Для центральной части Волгограда и прилегающих районов характерно расположение вдоль магистралей зон с большим количеством объектов притяжения транспортных и пешеходных потоков — административных, торговых, культурно-бытовых учреждений. Известно, что пассажиропоток на таких участках улично-дорожной сети остается постоянным в течение дня. Однако максимальное количество перевозимых пассажиров приходится на утренний и вечерний часы пик (рис. 1).

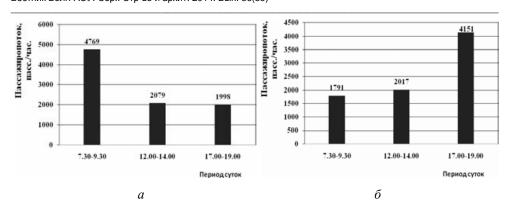


Рис. 1. Результаты исследования пассажиропотоков в течение суток по пр. Ленина в центральной части Волгограда: a — по направлению в Ворошиловский район;  $\delta$  — по направлению в Краснооктябрьский район

Общественный транспорт Волгограда представлен маршрутными такси, трамваями, троллейбусами и городскими автобусами. Троллейбусы и трамваи Волгограда обслуживает муниципальное унитарное предприятие «Метроэлектротранс». В его составе 2 трамвайных, 3 троллебусных и 1 трамвайнотроллейбусное депо. В сутки городские трамваи и троллейбусы перевозят около 400 тыс. пассажиров.

Распределение внутригородских перевозок по видам транспорта приведено в табл.

D )		`	`	
Ρασημολοπουμο	$\rho uvmnu20n0$	одских перевозок	าทก ผมสสม	тпаиспопта
1 achpeoenenae	unympucopo	оских персоозок	no onoun	принспорти

Вид транспорта	Удельный вес перевозимых			
	пассажиров, %			
Электротранспорт (трамваи, троллейбусы)	38			
Автобусы	9			
Маршрутные такси	53			

За последние несколько лет серьезную конкуренцию предприятиям общественного транспорта, таким как «Метроэлектротранс», ПАТП-2, ПАТП-4, ПАТП-7, стали составлять частные перевозчики, которые практически дублируют маршруты общественного транспорта. В основном они осуществляют перевозку пассажиров маршрутными такси («Газель», «Форд»). Как показывают исследования для городских магистралей с регулируемым движением, фактическая пропускная способность зависит от состава транспортного потока, параметров светофорного цикла и находится в пределах от 600 до 800 ед./ч. По результатам отечественных исследований пропускная способность полосы движения, используемой для движения общественного транспорта, в среднем составляет для троллейбусов 60...80 ед./ч, автобусов — 80...100 ед./ч, маршрутных такси — 350...500 ед./ч. Провозная способность приведенных видов транспорта: для троллейбусов — 3,4...3,6 тыс. пас./ч, для автобусов -3...3,5 тыс. пас./ч, для маршрутных такси («Газель») — 4...6 тыс. пасс./ч [2]. При неустановившемся транспортном потоке (коэффициент загрузки движением  $k_z > 0.7$ ) значения пропускной способности полос движения и провозной возможности будут значительно ниже.

При этом маршрутные такси перевозят значительную часть пассажиров, не имеющих льготного проезда на общественном транспорте, а предприятия общественного транспорта перевозят значительную часть пассажиров, пользующихся льготным и бесплатным проездом, а это, в свою очередь, делает работу крупных пассажирских предприятий нерентабельной. А именно эти предприятия способны обеспечить наиболее комфортную и безопасную перевозку пассажиров.

Следовательно, необходимо искать новые пути улучшения организации движения, повышения безопасности общественного транспорта и обеспечения достаточно высокого качества пассажирских перевозок. Необходимыми условиями этого являются: использование современных исправных пассажирских транспортных средств, соответствующих дорожным условиям и объему перевозимых пассажиров; обеспечение технического состояния автомобильных дорог, улиц, искусственных сооружений, по которым проходят маршруты движения общественного транспорта, их инженерного обустройства, ремонта и содержания в соответствии с современными требованиями безопасности движения, комфорта пассажиров, регламентированными нормативными документами; рациональная организация движения с предоставлением приоритетного проезда общественному маршрутному пассажирскому транспорту и применением с этой целью интеллектуальных систем и телекоммуникационных технологий.

В ряде зарубежных стран автобусные предприятия эксплуатируют двухэтажные автобусы, которые способны обеспечить большую провозную способность. В автобусе много сидячих мест, они обладают достаточно высокой маневренностью, большинство из них имеют приспособления для подъема в салон инвалидной коляски, поэтому данный подвижной состав пользуется спросом у населения и перевозки являются экономически выгодными.

Более гибкое решение задач контроля транспорта и диспетчерского управления движением возможно за счет применения спутниковых навигационных систем и автоматизированных систем мониторинга пассажиропотоков. Оперативная информация о пассажиропотоках позволяет оптимизировать режимы работы подвижного состава на линии. На сегодняшний день существует также возможность применения систем видеоинформации о лицах, совершающих акты вандализма в салонах общественного транспорта и нарушающих правила проезда с привязкой к месту и времени. Все эти меры позволяют повысить комфортность и безопасность водителя и пассажиров. Кроме того, реализуется автоматическая обработка путевой документации на основе данных с бортовой аппаратуры.

Рост автомобилизации, низкий уровень экологической безопасности конструкции транспортных средств, объектов автотранспортной и придорожной инфраструктуры, используемых материалов, техническое состояние автомобилей, несоблюдение регламентов и низкое качество проведения технического обслуживания и ремонта негативно воздействуют на окружающую среду в городах и на автомобильных дорогах [3]. На сегодняшний день Волгоград относится к числу городов с высоким уровнем загрязнения окружающей среды, где более 50 % от общего числа техногенных источников загрязнений приходится на долю суммарных загрязнений от автомобильного транспорта. Многочисленными научными исследованиями в данной области

российскими и зарубежными учеными доказано негативное воздействие автотранспорта на все экосистемы: воду, воздух, почву. Такая ситуация, естественно, сказывается на состоянии всех участников дорожного движения, а также на здоровье населения города, проживающего в непосредственной близости от проезжей части [4].

Вследствие вышесказанного обоснована комплексная оценка негативного воздействия автотранспорта по четырем основным факторам: шум, запыленность, загазованность и вибрация при условии использования балльной системы оценки:

$$\sum B = L + C_{\Pi} + C_{3} + E, \tag{1}$$

где L — уровень шума;  $C_{\text{п}}$  — запыленность;  $C_{\text{3}}$  — загазованность; E — уровень вибрации.

Для повышения экологической безопасности пассажирского транспорта предпочтительнее было бы использование электротранспорта, однако его низкая маневренность ограничивает применение. Другое, наиболее перспективное направление, — использование пассажирского подвижного состава, работающего на экологичных видах топлива.

Как показывает отечественный и зарубежный опыт использования подвижного состава, работающего на природном газе, это не только уменьшает выбросы в окружающую среду, но и, с учетом постоянно увеличивающейся стоимости дизельного топлива, оказывается экономичнее. Природный газ — высококачественное моторное топливо, превосходящее нефтяное, не требует химической переработки, обеспечивает высокие технико-экономические показатели автомобилей. Один кубометр газа способен заменить 1—1,12 л бензина. При этом его стоимость в три раза ниже. Кроме того, использование сжатого или сжиженного газа продлевает срок службы моторов в 1,5 раза, а также ведет двукратному уменьшению расхода смазочных материалов.

В настоящий момент наблюдается значительный рост числа газомоторных автотранспортных средств, основная причина в том, что топливная составляющая оказывает значительное влияние на величину тарифов на перевозку. Однако процент автомобильного парка, использующего наиболее дешевые виды автомобильного топлива — сжатый природный и сжиженный нефтяной газы, — весьма невысок, а именно это направление является наиболее перспективным для снижения стоимости перевозок и улучшения экологической обстановки.

Также снижению вредных выбросов способствует использование дизель-электрических автобусов. Экологичность — не единственное их преимущество. Дизель-электрические автобусы превосходят по экономии топлива автомобили, работающие на газовом топливе.

Региональным Министерством транспорта и дорожного хозяйства был заключен госконтракт с ООО «Волгабас» (г. Волжский). В октябре 2013 г. предприятие поставило городу 12 автобусов на общую сумму 42 млн р., 30 млн из которых выделил федеральный бюджет и 12 млн — областной. Автобусы, которые получило сегодня ПАТП № 7, оснащены по последнему слову техники: в них предусмотрены специальные пандусы для инвалидов, а также установлена навигационная система ГЛОНАСС. Машины работают на

экономичном и экологически чистом газомоторном топливе. Салон вмещает 55 человек; для горожан, спешащих в утренние часы на работу, эта цифра существенна [5]. Данные мероприятия существенно улучшат пассажирские перевозки.

Дальнейшее совершенствование организации движения и развитие общественного транспорта позволит повысить уровень качества пассажирских перевозок и обеспечит более экономичное использование улично-дорожной сети, что очень важно в условиях перенасыщения улиц и дорог Волгограда.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Клинковитейн Г. И., Афанасьев М. Б.* Организация дорожного движения. М. : Транспорт, 1997. 232 с.
- 2. Гудков В. А., Федотов В. Н. Квотирование числа пассажирских автотранспортных средств по критерию экологической безопасности // Стандарты и качество. 2003. № 2. С. 94—97.
- 3. *Азаров В. Н., Барикаева Н. С.* Учет пылевого загрязнения атмосферного воздуха при размещении и организации объектов городской среды // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2012. Вып. 29(48). С. 213—217.
- 4. *Сапожкова Н. В.* Комплексная оценка воздействия автотранспорта для регулирования экологической ситуации в городе // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2010. Вып. 20(39). С. 175—179.
- 5. Волгоград получил 12 новых автобусов // Аргументы и факты. 2013. 15 окт. URL: http://www.vlg.aif.ru/politic/gover/947691 (дата обращения: 20.11.13).
- 1. Klinkovshteyn G. I., Afanas'ev M. B. Organizatsiya dorozhnogo dvizheniya. M.: Transport, 1997. 232 s.
- 2. *Gudkov V. A., Fedotov V. N.* Kvotirovanie chisla passazhirskikh avtotransportnykh sredstv po kriteriyu ekologicheskoy bezopasnosti // Standarty i kachestvo. 2003. № 2. S. 94—97.
- 3. *Azarov V. N., Barikaeva N. S.* Uchet pylevogo zagryazneniya atmosfernogo vozdukha pri razmeshchenii i organizatsii ob"ektov gorodskoy sredy // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2012. Vyp. 29(48). S. 213—217.
- 4. *Sapozhkova N. V.* Kompleksnaya otsenka vozdeystviya avtotransporta dlya regulirovaniya ekologicheskoy situatsii v gorode // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2010. Vyp. 20(39). S. 175—179.
- 5. Volgograd poluchil 12 novykh avtobusov // Argumenty i fakty. 2013. 15 okt. URL: http://www.vlg.aif.ru/politic/gover/947691 (data obrashcheniya: 20.11.13).

© Серова Е. Ю., Сапожкова Н. В., Мельников В. В., 2014

Поступила в редакцию в январе 2014 г.

### Ссылка для цитирования:

Серова Е. Ю., Сапожкова Н. В., Мельников В. В. Проблемы организации движения и обеспечения экологической безопасности городского пассажирского транспорта в Волгограде // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 163—167.

УДК 656-056.266

### В. Ф. Сидоренко, Н. В. Сапожкова

# ОРГАНИЗАЦИЯ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ ЛЮДЕЙ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ ПО ЗРЕНИЮ

Проведены натурные исследования схем организации дорожного движения на уличнодорожной сети г. Волгограда и выявлены недостатки при использовании их людьми, имеющими ограниченные возможности по зрению. Проанализирован свод правил и нормативных документов по созданию безбарьерной среды и предложен комплекс мероприятий по ее усовершенствованию.

K л ю ч е в ы е с л о в а: обследование улично-дорожной сети, безопасность дорожного движения, маломобильная группа населения, недостатки в организации дорожного движения, тактильная плитка.

The authors carry out field study of traffic schemes of the road network in Volgograd and identify disadvantages for the use by disabled people, who have problems with eyesight. They analyze a set of rules and regulations on the creation of a barrier-free environment and offer complex of measures for its improvement.

K e y w o r d s: street road network inspection, road traffic safety, people with restricted mobility, disadvantages of the traffic organization, tactile tile.

Одним из основных условий привлекательности города и, как следствие, увеличения потока туристов является не только его историческая и архитектурная привлекательность, но и доступность для всех категорий людей.

На сегодняшний день около 10 % населения Волгограда имеет физические, сенсорные или интеллектуальные ограничения. Кроме того, более 20 % жителей города относятся к категории маломобильных групп населения — это беременные женщины, пешеходы с колясками, пенсионеры и т. д. Этим категориям людей для нормальной жизнедеятельности и беспрепятственного перемещения по городу требуются специальные технические устройства организации движения и дополнительное оборудование.

Из всех этих людей наиболее уязвимыми и беззащитными являются незрячие люди. Поэтому в первую очередь необходимо обеспечить доступность окружающей среды именно для этой группы населения. Если этого добиться, то и для остальных пешеходов будут обеспечены нормальные условия передвижения по городу.

Особое внимание необходимо уделять соблюдениям требований организации движения на проезжей части и примагистральной территории, так как эти зоны в городе являются участками повышенной опасности. Такие требования предусмотрены в соответствии со сводами правил и ГОСТами, нормирующими сигналы светофора, высоту бордюров на пешеходном тротуаре, уклон пандусов и т. д. Таким образом, в России существуют достаточно сносные нормы, направленные на обеспечение беспрепятственного доступа к объектам социальной, транспортной, инженерной, архитектурной, информационной инфраструктур. Но, как правило, на практике они не выполняются.

В ходе проведения исследований на улично-дорожной сети Волгограда выявлен ряд недостатков в организации безопасного и беспрепятственного передвижения людей, имеющих ограничения.

На пересечении улиц Невской и Новороссийской — там, где сконцентрированы социально значимые для инвалидов по зрению объекты (Общество слепых, Управление социальной защиты населения, библиотека для слепых), а также место их компактного проживания, — мы обнаружили множество нарушений. Так, на подходе к ул. Невской со стороны зданий Общества слепых и Социальной защиты обрывается тротуар. Точнее, он прерывается проезжей частью, но дальше не продолжается, а проезжая часть переходит в стоянку автотранспорта, и только за ней есть некое подобие пешеходного пути (рис. 1, a). Аналогичная ситуация и на пути от остановки транспорта на ул. Невской в обратном направлении. На пути инвалидов по зрению вырастают киоск и примыкающие к нему холодильники и стоящие транспортные средства (рис.  $1, \delta$ ).





a





б

Рис. 1. Недостатки в организации дорожного движения для пешеходов, имеющих ограниченные возможности: a — обрыв тротуара;  $\delta$  — препятствия на тротуаре

Самым большим недостатком на исследуемом участке является повсеместный обрыв тротуара или препятствия на тротуаре (45 %), что ведет за собой ограничение ориентации незрячего и вследствие этого попадание его в грязь или на проезжую часть. Немаловажным нарушением (около 30 %) является отсутствие бордюрного камня как ограждения тротуара — это влечет множество неудобств для незрячих и слабовидящих пешеходов. Помимо помощи в ориентации, бордюр предотвращает выход незрячего с тротуара, что в разы

уменьшает вероятность ДТП с участием инвалидов и маломобильных групп населения. Такие нарушения, как полуразрушенные лестницы, неудобные поручни и установка ненормативного пандуса или его отсутствие, встречались реже (около 25 %).

Согласно [1], обеспечение комфортных и безопасных условий передвижения инвалидов и других маломобильных групп населения с трудовыми и культурно-бытовыми целями следует учитывать на всех стадиях проектирования системы транспортных и пешеходных коммуникаций. Пешеходные пути должны быть обустроены с учетом требований доступности для всех групп инвалидов: с поражением опорно-двигательного аппарата, с недостатками зрения, слуха.

Предупреждающую информацию для людей с полной и частичной потерей зрения о приближении к препятствиям (лестницам, пешеходному переходу, окончанию островка безопасности и пр.) следует обеспечивать изменением фактуры поверхностного слоя покрытия дорожек и тротуаров. С этой целью для людей с глубокими нарушениями зрения необходимо, чтобы на городских тротуарах, дорогах, подземных переходах, полу в зданиях были специальные тактильные указатели (рис. 2, 3).

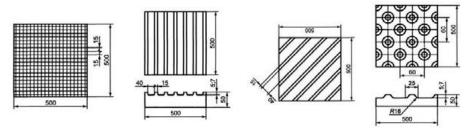


Рис. 2. Виды тактильных указателей

Тактильный наземный указатель — это средство отображения информации, представляющее собой полосу из различных материалов определенного цвета и рисунка рифления, позволяющее инвалидам по зрению распознавать типы дорожного или напольного покрытия путем осязания стопами ног, тростью или с помощью остаточного зрения.





Рис. 3. Тактильные и контрастные направляющие на остановках общественного транспорта

Незрячие помимо тактильных указателей направляющего назначения используют для ориентации бордюры. Высоту бордюров по краям пешеходных путей на участке рекомендуется принимать не менее 0,05...0,1 м. А вот высота бортового камня в местах пересечения тротуаров с проезжей частью, а также перепад высот бордюров, бортовых камней вдоль эксплуатируемых газонов и озелененных площадок, примыкающих к путям пешеходного движения, не должна превышать 0,04 м [2].

Отсутствие бордюра как ограждения тротуара влечет множество неудобств для незрячих и слабовидящих людей. Помимо помощи в ориентации, бордюр предотвращает выход незрячего с тротуара в зону повышенной опасности.

Согласно нормативной документации, для слабовидящих людей требуется контрастная окраска крайних ступеней лестниц, выступов, границ пандусов, бордюров и пр. Отметим, что необходимо дублировать краской все изменения рельефа на путях движения людей с инвалидностью: одиночные ступени, пороги, выступы различных конструкций на пути движения или с краю от него, покатое повышение/понижение рельефа пола или тротуара — в общем, все то, что создает угрозу зацепиться и/или споткнуться.

Совместно с сотрудниками Волгоградской ассоциации незрячих специалистов «Надежда» был адаптирован ряд объектов: покрасили ступеньки лестничных маршей, края пандусов, бордюров в контрастный желтый цвет во дворах по ул. им. Чапаева, вблизи проезжей части по ул. Невской, вход в библиотеку им. М. Горького, лестницы в автовокзале и железнодорожном вокзале, около школ и других социально значимых объектов в Центральном районе (рис. 4).





Рис. 4. Адаптация участков улично-дорожной сети к возможностям людей, имеющих остаточное зрение

Исследования показали, что данные мероприятия оказывают благоприятные воздействия на всех участников дорожного движения, повышая безопасность на участках. Более 80 % опрошенных отметили полезное действие мероприятий на адаптированных участках.

Согласно пункту 6.2.17 [3], на проезжей части для обозначения мест, выделенных для пересечения пешеходами, применяют дорожную разметку (рис. 5). Сегодня применяют и ненормативные формы разметки пешеходного перехода: между белыми полосами разметки добавляют красные или желтые. Это очень удобно для людей с глубокими нарушениями зрения. К тому же разметка выполняется холодным или термопластиком, что делает ее более шероховатой, а следовательно, и более удобной для незрячих и слабовидящих.



Рис. 5. Вид дорожной разметки пешеходного перехода

МДС 35-2.2000 [4] также предлагает ряд типовых вариантов обустройства улиц и переходов с учетом требований незрячих и слабовидящих. В качестве «естественных» направляющих линий, т. е. имеющихся, а не создаваемых специально для инвалидов элементов улицы, удобных для ориентации людей с дефектами зрения, пользующихся тростью, следует использовать фасады зданий, параллельных тротуару и примыкающих к нему непосредственно, бордюрные камни газонов, заборы, другие ограждения и т. п. (рис. 6).

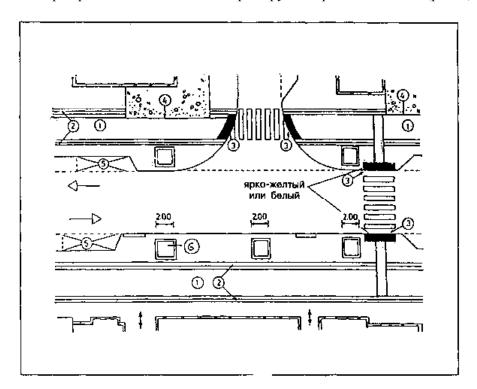


Рис. 6. Комплекс мероприятий по созданию безбарьерной среды на жилой или торговой улице (в комплекс входят устройства для людей с дефектами зрения, пользующихся тростью): I — безбарьерные пешеходные пространства; 2 — направляющие линии, контрастные окружающей среде по цвету и фактуре; 3 — маркированные края тротуара; 4 — «естественные» направляющие линии; 5 — автостоянки; 6 — огражденное место посадки деревьев

При этом нужно понимать, что доступная безбарьерная среда — это понятие комплексное. Не бывает доступной среды только для одной категории граждан: пандус помогает не только инвалиду-колясочнику, но и мамам с колясками, бабушкам с тележками, роллерам и скейтерам, а нужным образом устроенные бордюры и лестницы удобны и инвалидам, и старикам, и детям, и остальным гражданам. Соблюдение требований нормативных документов не только поможет сделать наш город более удобным и доступным для всех категорий людей, но и будет способствовать снижению количества и тяжести дорожно-транспортных происшествий с участием пешеходов.

Таким образом, для повышения привлекательности нашего города необходимо обеспечить доступность всех социально значимых и культурных объектов для жителей и туристов. В первую очередь, конечно же, необходимо обратить внимание на авто-, железнодорожные вокзалы и аэропорты, которые на сегодняшний день не в полной мере соответствуют предусмотренным требованиям.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. СП 35-105—2002. Реконструкция городской застройки с учетом доступности для инвалидов и других маломобильных групп населения.
- 2. СНиП 35-01—2001. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения.
- 3. ГОСТ Р 52289—2004. Технические средства организации дорожного движения. Правила применения дорожных знаков, разметки, светофоров, дорожных ограждений и направляющих устройств. М.: Стандартинформ, 2004.
- 4. МДС 35-2.2000. Рекомендации по проектированию окружающей среды, зданий и сооружений с учетом потребностей инвалидов и других маломобильных групп населения. Вып. 2. Градостроительные требования. М., 1996.
- 1. SP 35-105—2002. Rekonstruktsiya gorodskoy zastroyki s uchetom dostupnosti dlya invalidov i drugikh malomobil'nykh grupp naseleniya.
- 2. SNiP 35-01—2001. Dostupnost' zdaniy i sooruzheniy dlya malomobil'nykh grupp naseleniya.
- 3. GOST R 52289—2004. Tekhnicheskie sredstva organizatsii dorozhnogo dvizheniya. Pravila primeneniya dorozhnykh znakov, razmetki, svetoforov, dorozhnykh ograzhdeniy i napravlyayushchikh ustroystv. M.: Standartinform, 2004.
- 4. MDS 35-2.2000. Rekomendatsii po proektirovaniyu okruzhayushchey sredy, zdaniy i so-oruzheniy s uchetom potrebnostey invalidov i drugikh malomobil'nykh grupp naseleniya. Vyp. 2. Gradostroitel'nye trebovaniya. M., 1996.

© Сидоренко В. Ф., Сапожкова Н. В., 2014

Поступила в редакцию в январе 2014 г.

## Ссылка для цитирования:

Сидоренко В. Ф., Сапожкова Н. В. Организация дорожного движения для людей с ограниченными возможностями по зрению // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 168—173.

УДК 656.13.08

### Д. А. Скоробогатченко, А. В. Ерохин

## НЕЧЕТКАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЧИСЛА ДТП РЕГИОНА В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Проведена адаптация нечеткой нейросетевой модели прогнозирования состояния объекта к решению задач по определению уровня аварийности на автомобильных дорогах. Предложена методика прогнозирования количества дорожно-транспортных происшествий и представлены основные результаты работы модели.

K л ю ч е в ы е с л о в а : нечеткие нейронные сети, прогнозирование, дорожнотранспортные происшествия.

The authors adopted fuzzy connectionist model forecasting the condition of an object to the solution of the tasks on determination of the number of accidents on the roads. The method of forecasting the number of accidents is offered and the main results of the model is presented.

Key words: fuzzy connectionist networks, forecasting, accidents.

Существующее в настоящее время несоответствие фактического состояния дорожных объектов нормативному [1] приводит к ускоренному износу автомобильных дорог и, как следствие, возрастанию количества ДТП. В настоящее время ситуация такова, что ежегодные потери России в дорожно-транспортных происшествиях — более 40 тыс. человек, при этом материальный ущерб оценивается в 10 % годового национального дохода [2]. Так, только за 11 месяцев 2013 г. абсолютный прирост количества ДТП в Волгоградской области к аналогичному периоду прошлого года составил 400 % [3]! А в условиях предстоящего увеличения численности автомобильного транспорта и концентрации людей в связи с проведением чемпионата мира по футболу показатели могут достигнуть критических. В связи с этим целью исследования является научная оценка и анализ безопасности на автомобильных дорогах Волгоградской области, а также разработка теоретических подходов к прогнозированию числа ДТП региона.

Для решения вопросов, связанных с прогнозированием числа ДТП, необходимо определить круг факторов, так или иначе влияющих на уровень безопасности на автомобильных дорогах. Традиционно в отечественной науке [4, 5] возникновение ДТП определяется в контексте системы «транспортный поток — дорожные условия», при этом учитывается, что подсистема «транспортный поток» включает такие составляющие, как водитель, автомобиль и другие транспортные средства. Отметим, что в преддверии проведения в Волгограде чемпионата мира по футболу возрастает роль такого фактора, как плотность населения. В связи с этим в рамках данной работы рассмотрим зависимость числа ДТП от трех показателей: числа автомобилей, состояния автомобильных дорог и плотности населения. Данные по количеству ДТП, плотности населения, автомобилизации **уровню** транспортноэксплуатационного состояния автомобильных дорог по 75 регионам Российской Федерации [6, 7] представим на рис. 1.

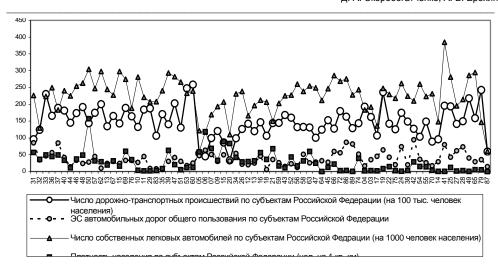


Рис. 1. Статистические данные, характеризующие зависимость количества ДТП от количества легковых автомобилей, эксплуатационного состояния автомобильных дорог и плотности населения по 75 субъектам Российской Федерации за 2011 г.

Для практической реализации системы прогнозирования числа ДТП предлагается использовать нечеткие нейронные сети (ННС), которые по сравнению с обыкновенными НС имеют такие достоинства, как возможность работы с неполными и неопределенными данными, а также возможность учета знаний экспертов в виде нечетких предикатных правил вывода вида «ЕСЛИ-ТО». Отметим, что в последние годы появилось большое количество публикаций, посвященных исследованиям систем с нечеткой логикой и ННС в задачах управления, аппроксимации, классификации и распознавания образов [8]. При решении задач прогнозирования ННС стали использоваться совсем недавно. В частности, в [9] ННС с выводом Мамдани использовались в задачах прогнозирования эксплуатационного состояния автомобильных дорог. В целом же анализ литературы показывает, что практически отсутствуют работы, посвященные исследованию применения ННС в задачах прогнозирования числа ДТП.

Рассмотрим общий вид ННС, используемый для реализации задач прогнозирования (рис. 2).

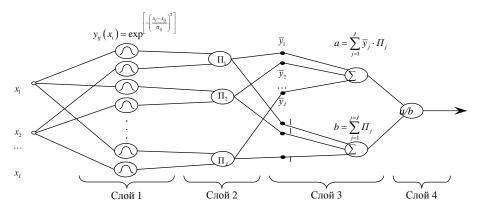


Рис. 2. Общий вид ННС для решения задач прогнозирования

В представленной структуре выделены четыре слоя. На первый слой поступают входные сигналы  $x_i$ , а на его выходе формируются значения функции принадлежности для этих сигналов. Функциональная зависимость между входом и выходом первого слоя определяется функцией Гаусса:

$$y_{ij}(x_i) = \exp^{\left[-\left(\frac{x_i - x_{ij}}{\sigma_{ij}}\right)^2\right]}$$
.

Ее параметры  $x_{ij}$  и  $\sigma_{ij}$  интерпретируются соответственно как центр и ширина функций принадлежности. Они будут модифицироваться в процессе обучения, что позволит улучшать результаты прогнозирования. Количество элементов первого слоя равно количеству всех нечетких множеств первого слоя. В случае J нечетких правил (j=1,...,J) и I входных переменных (i=1,...,I) с учетом того, что в каждом правиле любая входная переменная связана с другим нечетким множеством, количество узлов (элементов слоя 1) будет равно произведению количества входных переменных I и количества нечетких правил J.

Количество элементов второго слоя равно количеству правил N. Отметим, что  $\Pi_j$  представляют собой произведения значений нейронов второго слоя  $y_{ij}$  в соответствии с правилами. На выходе слоя 2 формируется результат вывода в виде значения функции принадлежности интегрального показателя конечного состояния объекта.

Слои 3 и 4 представляют собой реализацию зависимостей

$$a = \sum_{j=1}^{J} \overline{y}_{j} \Pi_{j}, \quad b = \sum_{j=1}^{J} \Pi_{j}.$$

На выходе слоя 4 сформируется выходное значение состояния объекта Y. Как уже отмечалось, особенностью использования ННС является механизм обучения, то есть корректировки параметров  $\omega_j$ ,  $x_{ij}$  и  $\sigma_{ij}$  с целью повышения точности прогноза. Практически это заключается в такой модификации перечисленных параметров, чтобы была минимальной мера погрешности, задаваемая выражением:

$$e = 0.5(Y - d)^{2}$$
. (1)

В выражении (1) параметр d представляет собой значение эталонного выходного сигнала ННС. Для корректировки весов ННС предлагается использовать выражение

$$\overline{y}_{j}(t+1) = \overline{y}_{j}(t) - \eta \frac{Y-d}{b} \Pi_{j},$$

где η — представляет собой скорость обучения (величина градиента). Для корректировки центров функций Гаусса:

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) - \eta \frac{Y-d}{b} \left(\overline{y}_j - Y\right) \Pi_j \frac{2(x_i - x_{ij})}{\left(\sigma_{ij}\right)^2}.$$

Для корректировки ширины функций Гаусса:

$$\sigma_{ij}(t+1) = \sigma_{ij}(t) - \eta \frac{Y-d}{b} (\overline{y}_j - Y) \Pi_j \frac{2(x_i - x_{ij})}{(\sigma_{ij})^2}.$$

Для реализации описанного алгоритма на языке C++ в среде разработки RAD Studio автором была разработана программа, работающая по алгоритму, представленному на рис. 3.

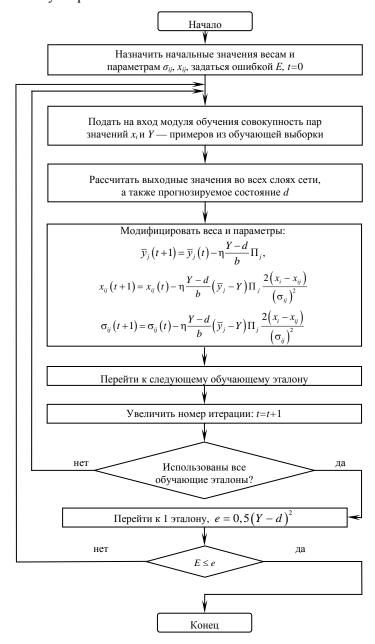


Рис. 3. Алгоритм повышения точности прогнозирования состояния объекта за счет корректировки правой части нечетких правил



Рис. 4. Результаты прогнозирования количества ДТП с использованием ННС, функционирующей на трех правилах, по 6 субъектам РФ в 2011 г.

На первом этапе работы была построена относительно простая ННС, связывающая между собой два наиболее очевидных фактора — эксплуатационное состояние автомобильных дорог и количество автомобилей — с количеством ДТП, функционирующая на основе трех правил и шести функций принадлежности переменных первого слоя. Результаты прогнозирования представим на рис. 4. Хотя в данном случае ошибка аппроксимации не превышает 14 %, что свидетельствует о хорошей точности прогноза, очевидно, что как такового обучения ННС не происходит. Это вызвано тем, что правил, описывающих произведения нейронов второго слоя, недостаточно.

В связи с этим предложено увеличить количество нейронов первого слоя до 18, а количество правил до 9 (рис. 5). Вид правил, а также параметры функций принадлежности (центр, ширина) и весовых коэффициентов связи представлены в табл.

Параметры начальных (до обучения) и конечных (после обучения) правил ННС по прогнозированию уровня ДТП в зависимости от двух факторов

<b>ЕСЛИ</b> Эксплуатационное состояние АД $x_1$				$oldsymbol{U}$ Уровень автомобилизации $x_2$				<b>ТО</b> Количество ДТП <i>Y</i>				
Назва-	$X_{ij}$			$\sigma_{ii}$	Hanna	$x_{ij}$		$\sigma_{ii}$		Назва-	Bec $\omega_i$	
ние	до	после	до	после	Назва- ние	до	после	до	после	ние	до	по- сле
Низ. 1	0	0,0001	0,25	0,25	Низ. 1	0	-0,001	0,25	0,24	Низ. 1	0	0,427
Низ. 2	0,1	0,09	0,25	0,24	Cp. 1	0,1	0,09	0,25	0,24	Cp. 1	0,4	0,441
Низ. 3	0,2	0,2	0,25	0,25	Выс. 1	0,2	0,2	0,25	0,25	Выс. 1	0,8	0,885
Cp. 1	0,4	0,4	0,25	0,25	Низ. 2	0,4	0,4	0,25	0,25	Низ. 2	0,1	0,09
Cp. 2	0,5	0,5	0,25	0,24	Cp. 2	0,5	0,5	0,25	0,25	Cp. 2	0,5	0,504
Cp. 3	0,6	0,6	0,25	0,25	Выс. 2	0,6	0,6	0,25	0,25	Выс. 2	0,9	0,667
Выс. 1	0,8	0,8	0,25	0,25	Низ. 3	0,8	0,8	0,25	0,25	Низ. 3	0,2	-0,01
Выс. 2	0,9	0,9	0,25	0,25	Cp. 3	0,9	0,9	0,25	0,25	Cp. 3	0,6	0,5
Выс. 3	1,0	1,0	0,25	0,25	Выс. 3	1,0	1,0	0,25	0,25	Выс. 3	1	0,537

На основе правил и функций принадлежности была реализована ННС по прогнозированию количества ДТП, общий вид которой представлен на рис. 6. Кроме этого была разработана подобная ННС, сочетающая в себе уровень

автомобилизации и плотность населения, но использующая несколько иной набор правил. После обучения ННС по алгоритму, описанному выше (см. рис. 3), на основе статистических данных по 75 регионам (см. рис. 1) был осуществлен прогноз количества ДТП по пяти регионам, не участвовавшим в процессе обучения ННС (рис. 6).

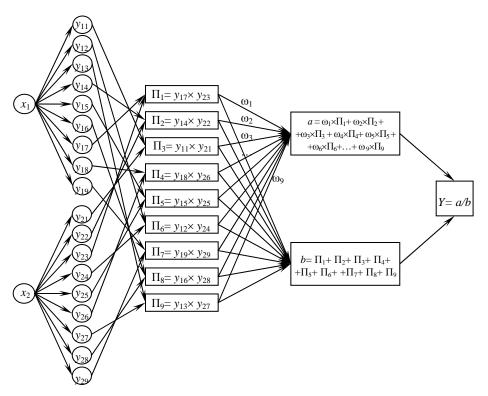


Рис. 5. ННС с девятью правилами по прогнозированию количества ДТП в зависимости от эксплуатационного состояния автомобильных дорог и уровня автомобилизации региона



Рис. 6. Результаты прогнозирования количества ДТП по 6 субъектам Российской Федерации в 2011—2012 гг.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод, что разработана функциональная ННС, результаты обучения которой приводят к более точным результатам прогноза количества ДТП региона (ошибка аппроксимации ~ 13 %) в зависимости от различных факторов. Установлены закономерности влияния уровня автомобилизации, эксплуатационного состояния и плотности населения на работу ННС по прогнозированию количества ДТП. Кроме этого определено, что дальнейшее совершенствование точности прогноза ННС возможно при обучении не по данным всех регионов за один год, а по данным одного региона за ряд лет, что отражает влияние на уровень безопасности неучтенных местных особенностей.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Алхимова Н. В.* О состоянии и развитии сети автомобильных дорог в Российской Федерации // Наука и техника в дорожной отрасли. 2006. № 4. С. 10.
- 2. Некоторые сведения о методах прогнозирования дорожно-транспортных происшествий и их анализ // Транспортные потоки городских дорог и улиц [сайт]. URL: http://markuts-v.narod.ru/index/0-42 (дата обращения 11.12.2013).
- 3. Статистика по ДТП // Госавтоинспекция МВД России [сайт]. URL: http://www.gibdd.ru/stat/ (дата обращения 11.12.2013).
- 4. *Бабков В. Ф.* Дорожные условия и безопасность движения : учебник для вузов. 3-е изд. М.: Транспорт, 1992. 288 с.
- 5. *Боровик В. С., Лукин В. А.* Обоснование мероприятий по обеспечению безопасности движения // Автомобильные дороги. 1995. № 3—4. С. 12—13.
- 6. Приказ Министерства транспорта РФ № 29 от 20.02.2013 «Об утверждении Методики расчета значений показателя «Прирост протяженности автомобильных дорог общего пользования регионального или межмуниципального значения, соответствующих нормативным требованиям к транспортно-эксплуатационным показателям (в процентах к 2011 году)», утв. распоряжением Правительства РФ от 15 ноября 2012 г. № 2096-р.
- 7. Статистические показатели по транспорту // Федеральная служба государственной статистики [сайт]. URL: http://www.gks.ru/ (дата обращения 11.12.2013).
- 8. *Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия Телеком, 2006. 452 с.
- 9. Скоробогатиченко Д. А. Методологические основы управления эксплуатационным состоянием автомобильных дорог по качественным параметрам, задаваемым вербально. Волгоград: ВолгГАСУ, 2011. 219 с.
- 1. *Alkhimova N. V.* O sostoyanii i razvitii seti avtomobil'nykh dorog v Rossiyskoy Federatsii // Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli. 2006. № 4. S. 10.
- 2. Nekotorye svedeniya o metodakh prognozirovaniya dorozhno-transportnykh proisshestviy i ikh analiz // Transportnye potoki gorodskikh dorog i ulits [sayt]. URL: http://markuts-v.narod.ru/index/0-42 (data obrashcheniya 11.12.2013).
- 3. Statistika po DTP // Gosavtoinspektsiya MVD Rossii [sayt]. URL: http://www.gibdd.ru/stat/(data obrashcheniya 11.12.2013).
- 4. *Babkov V. F.* Dorozhnye usloviya i bezopasnost' dvizheniya : uchebnik dlya vuzov. 3-e izd. M. : Transport, 1992. 288 s.
- 5. *Borovik V. S., Lukin V. A.* Obosnovanie meropriyatiy po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya // Avtomobil'nye dorogi. 1995. № 3—4. S. 12—13.
- 6. Prikaz Ministerstva transporta RF № 29 ot 20.02.2013 «Ob utverzhdenii Metodiki rascheta znacheniy pokazatelya «Prirost protyazhennosti avtomobil'nykh dorog obshchego pol'zovaniya regional'nogo ili mezhmunitsipal'nogo znacheniya, sootvetstvuyushchikh normativnym trebovaniyam k transportno-ekspluatatsionnym pokazatelyam (v protsentakh k 2011 godu)», utv. rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 15 noyabrya 2012 g. № 2096-r.
- 7. Statisticheskie pokazateli po transportu // Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki [sayt]. URL: http://www.gks.ru/ (data obrashcheniya 11.12.2013).

- 8. Rutkovskaya D., Pilin'skiy M., Rutkovskiy L. Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy. M.: Goryachaya liniya Telekom, 2006. 452 s.
- 9. *Skorobogatchenko D. A.* Metodologicheskie osnovy upravleniya ekspluatatsionnym sostoyaniem avtomobil'nykh dorog po kachestvennym parametram, zadavaemym verbal'no. Volgograd : VolgGASU, 2011. 219 s.

© Скоробогатченко Д. А., Ерохин А. В., 2014

# Поступила в редакцию в апреле 2014 г.

#### Ссылка для цитирования:

Скоробогатиченко Д. А., Ерохин А. В. Нечеткая нейросетевая модель для прогнозирования числа ДТП региона в условиях ограниченной информации // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 174—181.

# ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

УДК 697.971

#### С. А. Колодяжный, А. А. Кавыгин

# РАСЧЕТ СОВРЕМЕННЫХ ПЛАСТИНЧАТЫХ РЕКУПЕРАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

Представлена методика расчета пластинчатого рекуперативного теплоутилизатора. Проведена серия экспериментов, в ходе которых определены поправочные коэффициенты, справедливые для конструкции перекрестно-противоточного рекуператора. Выявлен характер конленсации.

Ключевые слова: рекуператор, методика, расчет, теплоутилизация.

The article presents the design procedure of plate recuperative heat exchanger. A series of experiments, which helped to determine coefficient factor, relevant for the construction of cross-contraflow recuperator, is carried out. The type of condensation is revealed.

Key words: recuperator, methodology, design, heat recovery.

Пластинчатый теплоутилизатор является на сегодняшний день одним из наиболее перспективных устройств утилизации теплоты вытяжного воздуха. Современная промышленность выпускает пластинчатые теплоутилизаторы новых конструкций, например перекрестно-противоточные рекуператоры (рис. 1). Эффективность теплоутилизации в таких теплообменниках достигает 80...90 %.



Рис. 1. Перекрестно-противоточный рекуперативный теплоутилизатор

Для широкого применения данного рекуператора в проектах необходимо обладать методикой расчета, которая может быть использована в качестве алгоритма для ЭВМ, а также учитывать конструктивные особенности рассматриваемого

теплообменника. На сегодняшний день наиболее распространенным способом расчета теплообменников, в том числе и рекуператоров, является расчет путем решения системы уравнений теплопередачи (1) и теплового баланса (2):

$$Q = kF\Delta T; \tag{1}$$

$$Q = G(J_2 - J_1), \tag{2}$$

где Q — количество передаваемой теплоты, Bт; k — коэффициент теплопередачи,  $Bt/m^2$  °C;  $\Delta T$  — среднелогарифмический температурный напор; J — энтальпия,  $\kappa Дж/\kappa \Gamma$ .

Вопрос расчета пластинчатых теплоутилизаторов подробно рассмотрен в [1—4]. Однако в перечисленных публикациях не дается однозначного ответа на следующие вопросы: какова формула расчета критерия Нуссельта для каналов рекуператора? каков характер влияния конденсации на коэффициент теплоотдачи, формула для расчета температурного напора  $\Delta T$ ?

В современных исследованиях перечисленным вопросам уделяется особое внимание. Например, в работах [5] и [6] подтверждены экспериментально зависимости, позволяющие вычислять критерий Нуссельта при движении воздуха в плоских каналах перекрестноточных рекуперативных утилизаторов с интенсификаторами конвективного теплообмена. В работе [7] экспериментально исследуется тепломассообмен в условиях конденсации влаги на стенках теплоутилизатора, причем из данных исследований делается вывод о незначительной интенсификации тепломасообмена при капельной конденсации. Кроме того, в работах [5] и [7] отмечается обледенение поверхностей тепломассообмена при определенных параметрах воздушных потоков. В [8] моделируется конвективное течение воздуха вдоль вертикальной пластины с переменной температурой, причем одна из задач данного моделирования — расчет критерия Нуссельта. Аналогичный вопрос рассматривается в [9], [10]. В статьях [11] и [12] рассматривается процесс конвективного теплообмена при конденсации. В статьях [13] и [14] исследуется процесс образования пленки жидкости на поверхности при конденсации. Эти же вопросы исследуются и зарубежными учеными [15—18]. Таким образом, в современных исследованиях перечисленные выше проблемы расчета критериев теплообмена и исследования теплообмена при конденсации можно считать открытыми.

В основе предлагаемой методики расчета лежит альтернативный способ расчета рекуперативных теплообменников, разработанный Ф. Бошняковичем и описанный в [2], основанный на логарифмической зависимости эффективности теплообменника от коэффициента теплопередачи, площади теплообмена и теплоемкостей массовых расходов сред, проходящих через рекуператор. В основу алгоритма для автоматизированного расчета рекуператора предлагается взять именно этот метод. В [2] путем решения дифференциальных уравнений теплопередачи представлена следующая функция КПД (рабочая характеристика) рекуператора для теплообмена по принципу «противоток»:

$$\eta = \frac{1 - \exp\left[\left(\frac{1}{C_e} - \frac{1}{C_s}\right)kF\right]}{1 - \frac{C_e}{C_s}\exp\left[\left(\frac{1}{C_e} - \frac{1}{C_s}\right)kF\right]},\tag{3}$$

где  $C_e$  и  $C_s$  — теплоемкости массовых расходов соответственно приточного и вытяжного воздуха,  $\mathrm{Bt/^{\circ}C}.$ 

Основная идея описанного ниже метода заключается в том, что если известно направление «луча процесса» для вытяжного воздуха, то известно, какое количество теплоты необходимо для охлаждения 1 кг влажного воздуха на 1 градус, то есть теплоемкость. Причем это количество теплоты будет учитывать и «скрытую» теплоту, т. к. мы принимаем во внимание направление «луча процесса». Таким образом, влажный воздух рассматривается как «газ», и формула (3) для рассматриваемого случая верная.

Предлагаемый метод автоматизированного расчета основывается на равенстве значений КПД при работе рекуператора, рассчитанных по формулам (3) и (4):

$$\eta_f = \frac{\left(t_{1e} - t_{2e}\right)}{\left(t_{1e} - t_{1s}\right)},\tag{4}$$

где  $t_{1e}$ ,  $t_{2e}$  — температуры вытяжного воздуха соответственно на входе и выходе из рекуператора;  $t_{1s}$  — температура приточного воздуха на входе в рекуператор. Необходимо отметить, что понятие КПД применительно к данному расчету не является истинным значением КПД рекуператора, так как оно рассчитывается для вытяжного воздуха.

Для нахождения параметров установившегося режима работы рекуператора необходимо применить метод итерационных исчислений, то есть изменять значение температуры вытяжного воздуха на выходе  $t_{e2}$ , при каждом новом шаге итераций производить следующие действия:

- 1) определять энтальпию вытяжного воздуха на выходе из рекуператора  $t_{e2}$  в зависимости от начальных параметров воздуха и «луча процесса». Зависимости, позволяющие определить параметры состояния влажного воздуха, представлены в [19]. Способ вычисления данного параметра подробно описан в [20];
- 2) определение по формуле (2) полного количества теплоты  $Q_t$ , соответствующего  $t_{e2}$  на конкретном шаге;
- 3) определение температуры приточного воздуха  $t_{s2}$ , соответствующей конкретной температуре  $t_{e2}$  при известном  $Q_t$ , определенном в шаге 2. Для определения  $t_{s2}$  используется уравнение теплового баланса;
- 4) вычисление из формулы (5) теплоемкостей массовых расходов приточного и вытяжного воздуха для конкретного итерационного шага:

$$Q = C(t_2 - t_1); \tag{5}$$

5) вычисление функции КПД по формулам (3) и (4), определение разницы между этими значениями:

$$\Delta \eta = |\eta_f - \eta|. \tag{6}$$

При минимальном значении Δη расчет считается завершенным. Компьютерная программа, за алгоритм которой принята предложенная методика, показывает результаты, отличие которых от экспериментальных данных составляет не более 5 %. Эффективность, вычисляемая по формуле (3), справедлива для «чистого» противотока и названа «рабочей характеристикой рекуператора».

Для определения функции КПД исследуемого теплообменника были проведены испытания в лабораторных условиях. Для эксперимента была сконструирована приточно-вытяжная установка с пластинчатым перекрестнопротивоточным рекуператором (рис. 2). При испытаниях измерялись расход, температура и влажность входящих и выходящих потоков воздуха.

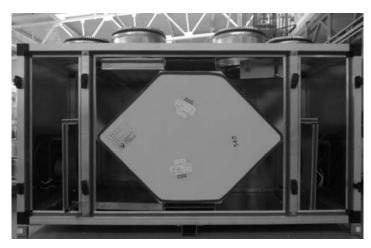


Рис. 2. Приточно-вытяжная установка с перекрестно-противоточным рекуператором, предназначенная для испытаний

Географическое месторасположение испытательной лаборатории — г. Рязань. Анализ испытаний производился следующим образом: определялся фактический КПД рекуператора со стороны вытяжного воздуха по формуле (4), после этого производился расчет КПД по формуле (3), то есть как для противотока. Очевидно, что конструкция рекуператора только частично обеспечивает схему «противоток». Поэтому, согласно [2], значение КПД для данной схемы рекуперации должно быть уменьшено в *п* раз по отношению к значению функции КПД, рассчитанному для «чистого» противотока. Для нахождения коэффициента *п* производилось сравнение функции КПД, вычисленной по формулам (3) и (4). Коэффициент *п*, характеризующий отклонение исследуемого типа, определялся по формуле

$$n = \frac{\eta}{\eta_f}.\tag{7}$$

Всего проведено 37 экспериментов при различных комбинациях параметров входящего и выходящего из рекуператора воздуха. Планирование и анализ данных эксперимента производились в соответствии с принципами, описанными в [21]. Среднее значение коэффициента n=1,052. Следует отметить, что значения коэффициента n в экспериментах, где наблюдался отток конденсата из каналов вытяжного воздуха, в большинстве своем имеют значения выше среднего, а в экспериментах, где значение явления конденсации не наблюдалось, значения n были в большинстве своем ниже среднего. В проведенной серии экспериментов точной зависимости коэффициента n от количества конденсата не выявлено, данный вопрос можно считать отдельной темой для исследований. Однако увеличение коэффициента n при

конденсации в данном случае является показателем ухудшения теплообмена, что позволяет утверждать, что в данном процессе имеет место пленочная конденсация, а не капельная. Данный вывод сделан на основании [22], [23]. В то же время улучшение теплообмена при отсутствии конденсации или при минимальной конденсации хорошо согласуется с выводами, сделанными в [11], а именно: теплообмен влажного воздуха и стенки при низких концентрациях пара описывается закономерностями для «сухой» стенки. Для вычисления числа Нуссельта использованы результаты исследований, которые подтверждены в работе [5]:

$$Nu = 0.007 \,\text{Re} + 4.76.$$
 (8)

Таким образом, для исследуемого типа рекуператора справедлива следующая зависимость для вычисления функции КПД:

$$\eta = \frac{1 - \exp\left[\left(\frac{1}{C_e} - \frac{1}{C_s}\right)kF\right]}{1 - \frac{C_e}{C_s}\exp\left[\left(\frac{1}{C_e} - \frac{1}{C_s}\right)kF\right]} \frac{1}{1,052}.$$
(9)

Графики функции КПД исследуемого перекрестно-противоточного рекуператора, построенные с использованием формулы (9), представлены на рис. 3.

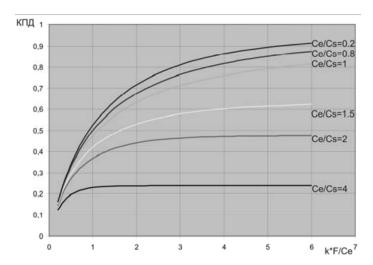


Рис. 3. Рабочая характеристика исследуемого рекуператора

При расчете перекрестно-противоточного рекуператора по описанной выше методике необходимо учитывать поправочный коэффициент для конкретной модели теплообменника, то есть вместо формулы (3) необходимо использовать формулу (9).

# Выводы

1. Расчет пластинчатого рекуперативного теплоутилизатора итерационным методом с использованием функции КПД является наиболее подходящим для инженерных задач методом расчета, т. к. в данном случае отсутствует необходимость вычислять средний температурный напор, а функция КПД (рабочая характеристика) описывается элементарной математической функцией.

- 2. Для привязки методики теплотехнического расчета пластинчатого рекуператора по функции КПД к конкретной конструкции перекрестно-противоточного рекуператора необходимо использовать коэффициент n, который в данном случае определен экспериментальным путем.
- 3. При работе теплоутилизатора наблюдается пленочная конденсация, которая несколько уменьшает коэффициент теплоотдачи.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Справочник по теплообменникам: в 2-х т. Т. 2 / пер. с англ. под ред. О. Г. Мартыненко. М. : Энергоатомиздат, 1987. С. 96—104.
- 2. Хаузен Х. Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе. М.: Энергоиздат, 1981. 384 с.
- 3. *Богословский В. Н., Поз М. Я.* Теплофизика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. М.: Стройиздат, 1983. 319 с.
- 4. *Карпис Е. Е.* Энергосбережение в системах кондиционирования воздуха. М. : Стройиздат, 1986. 267 с.
- 5. Кректунов А. О. Теплообменники-утилизаторы с эффективной поверхностью переноса для систем вентиляции и систем кондиционирования воздуха: дис. канд. техн. наук. СПб., 2005. 173 с.
- 6. Белоногов Н. В. Пути совершенствования пластинчатых перекрестноточных рекуперативных теплообменников: дис. канд. техн. наук. СПб., 2005. 204 с.
- 7. *Шаталов М. П.* Обоснование параметров теплоутилизационной установки на базе полимерного перекрестноточного пластинчатого теплообменника для животноводческих помещений: дисс. канд. техн. наук. М., 2010. 165 с.
- 8. *Терехов В. И.*, *Экаид А. Л.* Ламинарная свободная конвекция между вертикальными параллельными пластинами с различными температурами // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19. № 4. С. 415—429.
- 9. *Gryzagoridis J.* Combined free and forced convection from an isothermal vertical plate // International journal of heat and mass transfer. 1973. Vol. 18. Pp. 911—916.
- 10. *Brouwers H. J.* Film condensation on non-isothermal vertical plates // International journal of heat and mass transfer. 1989. Vol. 32. № 4. Pp. 655—663.
- 11. *Волчков Э. П., Терехов В. В., Терехов В. И.* Тепломассообмен в пограничном слое при вынужденном течении влажного воздуха с конденсацией пара на поверхности // Теплофизика и аэромеханика. 2000. Т. 7. № 2. С. 257—266.
- 12. Гоголин И. И. Экспериментальные исследования тепломассопереноса при конденсации движущейся парогазовой смеси // Теплофизика и аэромеханика. 1996. Т. 3. № 3. С. 201—213.
- 13. Чернявский А. Н., Павленко А. Н. Численное моделирование процесса волнообразования в стекающих пленках жидкости // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18. № 3. С. 441—448.
- 14. *Перепелица Б. В.* О влиянии микротекстуры на формирование пленки жидкости на вертикальной поверхности // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18. № 3. С. 519—522.
- 15. Male van P., Croon de M.H.JM., Tiggelaar R. M., Berg van den A., Schouten J. G. Heat and mass transfer in a square microchannel with asymmetric heating // International journal of heat and mass transfer. 2004. Vol. 47. Pp. 87—99.
- 16. Vlachogiannis M., Bontozoglou V. Observations of solitary wave dynamics of film flows // J. Fluid Mech. 2001. Vol. 435. P. 191—215.
- 17. Zhao L., Cerro R. L. Experimental characterization of viscous film flows over complex surfaces // Intern. J. Multiphase Flow. 1992. Vol. 6. P. 495—516.
- 18. Pavlenko A., Pecherkin N., Chekhovich V., Volodin O. Hydrodynamics in falling liquid films on surfaces with complex geometry // Microgravity Sci. Technol. 2009. Vol. 21. Suppl. 1. P. 207—213.
- 19. Бурцев С. И., Цветков Ю. Н. Влажный воздух. Состав и свойства : учеб. пособие. СПб. : СПбГАХПТ, 1998. 146 с.
- 20. Колодяжный С. А., Сотникова К. Н., Кавыгин А. А. Автоматизированный расчет процесса охлаждения воздуха в жидкостном теплообменнике // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 2. С. 98—102.
- 21. Нинул А. С. Оптимизация целевых функций: Аналитика. Численные методы. Планирование эксперимента. М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 2009. 336 с.
  - 22. Леонтьев А. И. Теория тепломассообмена. М.: Высш. шк., 1979. 495 с.
- 23. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача: учебник для вузов. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.

- 1. Spravochnik po teploobmennikam: v 2-kh t. T. 2 / per. s angl. pod red. O. G. Martynenko. M. : Energoatomizdat, 1987. S. 96—104.
- 2. Khauzen Kh. Teploperedacha pri protivotoke, pryamotoke i perekrestnom toke. M.: Energoizdat, 1981. 384 s.
- 3. Bogoslovskiy V. N., Poz M. Ya. Teplofizika apparatov utilizatsii tepla sistem otopleniya, ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukha. M.: Stroyizdat, 1983. 319 s.
- 4. Karpis E. E. Energosberezhenie v sistemakh konditsionirovaniya vozdukha. M.: Stroyizdat, 1986. 267 s.
- 5. Krektunov A. O. Teploobmenniki-utilizatory s effektivnoy poverkhnost'yu perenosa dlya sistem ventilyatsii i sistem konditsionirovaniya vozdukha : dis. kand. tekhn. nauk. SPb., 2005. 173 s.
- 6. Belonogov N. V. Puti sovershenstvovaniya plastinchatykh perekrestnotochnykh rekuperativnykh teploobmennikov: dis. kand. tekhn. nauk. SPb., 2005. 204 s.
- 7. Shatalov M. P. Obosnovanie parametrov teploutilizatsionnoy ustanovki na baze polimernogo perekrestnotochnogo plastinchatogo teploobmennika dlya zhivotnovodcheskikh pomeshcheniy: diss. kand. tekhn. nauk. M., 2010. 165 s.
- 8. *Terekhov V. I.*, *Ekaid A. L.* Laminarnaya svobodnaya konvektsiya mezhdu vertikal'nymi parallel'nymi plastinami s razlichnymi temperaturami // Teplofizika i aeromekhanika. 2012. T. 19. № 4. S. 415—429.
- 9. *Gryzagoridis J.* Combined free and forced convection from an isothermal vertical plate // International journal of heat and mass transfer. 1973. Vol. 18. Pp. 911—916.
- 10. Brouwers H. J. Film condensation on non-isothermal vertical plates // International journal of heat and mass transfer. 1989. Vol. 32. № 4. Pp. 655—663.
- 11. *Volchkov E. P., Terekhov V. V., Terekhov V. I.* Teplomassoobmen v pogranichnom sloe pri vynuzhdennom techenii vlazhnogo vozdukha s kondensatsiey para na poverkhnosti // Teplofizika i aeromekhanika. 2000. T. 7. № 2. S. 257—266.
- 12. *Gogolin I. I.* Eksperimental'nye issledovaniya teplomassoperenosa pri kondensatsii dvizhushcheysya parogazovoy smesi // Teplofizika i aeromekhanika. 1996. T. 3. № 3. S. 201—213.
- 13. *Chernyavskiy A. N., Pavlenko A. N.* Chislennoe modelirovanie protsessa volnoobrazovaniya v stekayushchikh plenkakh zhidkosti // Teplofizika i aeromekhanika. 2011. T. 18. № 3. S. 441—448.
- 14. *Perepelitsa B. V.* O vliyanii mikrotekstury na formirovanie plenki zhidkosti na vertikal'noy poverkhnosti // Teplofizika i aeromekhanika. 2011. T. 18. № 3. S. 519—522.
- 15. Male van P., Croon de M.H.JM., Tiggelaar R. M., Berg van den A., Schouten J. G. Heat and mass transfer in a square microchannel with asymmetric heating // International journal of heat and mass transfer. 2004. Vol. 47. Pp. 87—99.
- 16. *Vlachogiannis M., Bontozoglou V.* Observations of solitary wave dynamics of film flows // J. Fluid Mech. 2001. Vol. 435. P. 191—215.
- 17. Zhao L., Cerro R. L. Experimental characterization of viscous film flows over complex surfaces // Intern. J. Multiphase Flow. 1992. Vol. 6. P. 495—516.
- 18. Pavlenko A., Pecherkin N., Chekhovich V., Volodin O. Hydrodynamics in falling liquid films on surfaces with complex geometry // Microgravity Sci. Technol. 2009. Vol. 21. Suppl. 1. P. 207—213.
- 19. Burtsev S. I., Tsvetkov Yu. N. Vlazhnyy vozdukh. Sostav i svoystva : ucheb. posobie. SPb. : SPbGAKhPT, 1998. 146 s.
- 20. *Kolodyazhnyy S. A., Sotnikova K. N., Kavygin A. A.* Avtomatizirovannyy raschet protsessa okhlazhdeniya vozdukha v zhidkostnom teploobmennike // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2013. T. 9. № 2. S. 98—102.
- 21. *Ninul A. S.* Optimizatsiya tselevykh funktsiy: Analitika. Chislennye metody. Planirovanie eksperimenta. M.: Izd-vo fiz.-mat. lit-ry, 2009. 336 s.
  - 22. Leont'ev A. I. Teoriya teplomassoobmena. M.: Vyssh. shk., 1979. 495 s.
- 23. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. Teploperedacha: uchebnik dlya vuzov. M.: Energoizdat, 1981. 416 s.

© Колодяжный С. А., Кавыгин А. А., 2014

Поступила в редакцию в январе 2014 г.

#### Ссылка для цитирования:

Колодяжный С. А., Кавыгин А. А. Расчет современных пластинчатых рекуператоров с использованием функции коэффициента полезного действия // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 182—188.

УДК 536.24

# В. М. Фокин, А. В. Ковылин, А. В. Попова

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СТЕКЛОПАКЕТА ДЛЯ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ

Приведены исследования однокамерного и двухкамерного стеклопакетов для ограждения зданий. Рассмотрено влияние применения разного количества стекол на теплофизические свойства стеклопакета. Приведены графики распределения коэффициента теплопроводности стеклопакета и термического сопротивления теплопроводности стеклопакета от средней температуры стеклопакета, а также распределение плотности теплового потока от разности температур стеклопакета.

Ключевые слова: энергоэффективность, однокамерный стеклопакет, двухкамерный стеклопакет, плотность теплового потока, коэффициент теплопроводности, термическое сопротивление теплопроводности.

Studies of single-glazed and double-glazed windows for the enclosures of buildings are provided. The impact of the use of different amount of glass on the thermo-physical properties of window is considered. The graphs of distribution of the coefficient of thermal conductivity coefficient of a glass unit and thermal resistance of thermal conductivity of a glass unit from the average temperature of the glass unit are given, as well as the distribution of the density of the heat flow from the temperature difference of the window.

 $K\ e\ y\ w\ o\ r\ d\ s$ : energy efficiency, single-glazed window, double-glazed window, density of the thermal flow, thermal conductivity coefficient, thermal resistance of thermal conductivity.

Наибольшие потери теплоты через ограждения зданий проходят через оконные стеклопакеты. Для снижения потерь теплоты в окружающую среду от наружных ограждений зданий — оконных стеклопакетов — нужно знать их теплопроводность, термическое сопротивление теплопроводности, температуропроводность.

Для определения теплофизических свойств были изготовлены различные варианты стеклопакетов: однокамерный с размерами  $250 \times 250 \times 24$  мм и двух-камерный с размерами  $250 \times 250 \times 32$  мм. Однокамерный стеклопакет имеет два стекла толщиной 4 мм, зазор 16 мм (4—16—4) мм. Двухкамерный стеклопакет имеет три стекла толщиной 4 мм и зазорами 10 мм (4—10—4—10—4) мм.

Для определения теплофизических свойств оконных стеклопакетов использовался измеритель теплопроводности ИТП-МГ4-250. Заводской прибор — измеритель теплопроводности ИТП-МГ4-250 (размер испытываемого образца  $250 \times 250$  мм, толщина 5...50 мм) предназначен для определения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  и термического сопротивления R твердых строительных материалов, а также материалов, предназначенных для тепловой изоляции зданий при стационарном тепловом режиме [1].

Задавая в приборе ИТП-МГ4-250 значения температуры холодильника  $t_{\rm x}$  от 5 до 20 °C и нагревателя  $t_{\rm H}$  от 25 до 46 °C, получили различные значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , термического сопротивления теплопроводности R и плотности теплового потока q однокамерного (4—16—4) и двухкамерного (4—10—4—10—4) стеклопакетов. В табл. 1 приведены полученные экспериментальные значения теплофизических свойств однокамерного стеклопакета.

Таблица 1

Теплофизические	свойства	однокамерного	стеклопакета	(4—	-16—	-4)

δ, мм	t <sub>cp</sub> , °C	Δt, °C	t <sub>H</sub> , °C	t <sub>x</sub> , °C	$\lambda$ , Bt/( $M \cdot {}^{\circ}C$ )	$R$ , ( $M^2 \cdot K$ )/BT	$q$ , Bt/m $^2$
	15	20	25	5	0,149	0,161	124,2
	17,5	15	25	10	0,155	0,154	97
	20	10	25	15	0,162	0,148	67,6
24	22	6	25	19	0,168 0,142		42,1
	22,5	7	26	19	0,168	0,142	49
	25	12	31	19	0,17	0,141	85
	25	20	35	15	0,169	0,142	140,8
	27,5	17	36	19	0,173	0,138	122,4
	30	20	40	20	0,177	0,135	147,4
	30	22	41	19	0,176	0,136	161,3

Средняя температура стеклопакета определяется по формуле

$$t_{\rm cp} = \left(t_{\rm H} - t_{\rm x}\right) / 2,$$

где  $t_{\rm H}$  — температура нагревателя, °C;  $t_{\rm X}$  — температура холодильника, °C. Разность температур стеклопакета определяется по формуле

$$\Delta t = t_{\rm H} - t_{\rm X}$$
.

На рис. 1 приведено экспериментальное распределение коэффициента теплопроводности  $\lambda$  от средней температуры  $t_{\rm cp}$  однокамерного стеклопакета.



Рис. 1. Экспериментальные распределения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  от средней температуры  $t_{\rm cp}$  однокамерного стеклопакета (4—16—4)

По результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод, что с возрастанием средней температуры  $t_{\rm cp}$  стеклопакета от 15 до 30 °C коэффициент теплопроводности  $\lambda$  увеличивается на 18,1 %. Так, например, при средней температуре стеклопакета  $t_{\rm cp} = 15$  °C коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,149~{\rm BT/(M\cdot ^{\circ}C)}$ , а при средней температуре стеклопакета  $t_{\rm cp} = 30$  °C коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,177~{\rm BT/(M\cdot ^{\circ}C)}$  [2].

На рис. 2 приведены значения коэффициента термического сопротивления теплопроводности R от средней температуры  $t_{\rm cp}$  однокамерного стеклопакета.

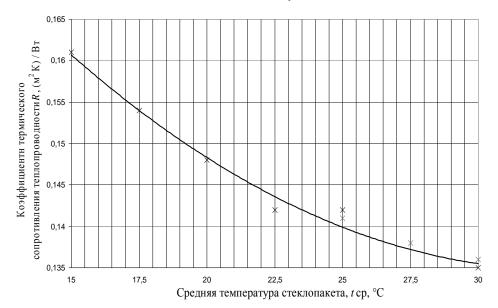


Рис. 2. Экспериментальные распределения коэффициента термического сопротивления теплопроводности R от средней температуры  $t_{\rm cp}$  однокамерного стеклопакета (4—16—4)

По результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод, что с возрастанием средней температуры стеклопакета от 15 до 30 °C коэффициент термического сопротивления теплопроводности R уменьшается на 15,5 %. Так, например, при средней температуре стеклопакета  $t_{\rm cp}=15$  °C коэффициент термического сопротивления теплопроводности  $R=0,161~({\rm M}^2\cdot{\rm K})/{\rm BT}$ , а при средней температуре стеклопакета  $t_{\rm cp}=30~{\rm ^{\circ}C}$  коэффициент термического сопротивления теплопроводности  $R=0,135~({\rm M}^2\cdot{\rm K})/{\rm BT}$ .

На рис. 3 приведены значения плотности теплового потока q от разницы температур  $\Delta t$  однокамерного стеклопакета.

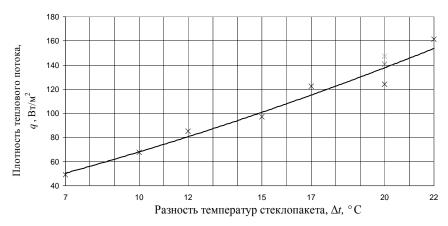


Рис. 3. Экспериментальные распределения плотности теплового потока q от разности температур  $\Delta t$  однокамерного стеклопакета (4—16—4)

По результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод, что с возрастанием разности температуры стеклопакета  $\Delta t$  от 7 до 22 °C плотность теплового потока q увеличивается на 229,2 %. Так, например, при разности температур стеклопакета  $\Delta t = 7$  °C плотность теплового потока  $q = 49 \text{ BT/m}^2$ , а при разности температур стеклопакета  $\Delta t = 22 \text{ °C}$  плотность теплового потока  $q = 161,3 \text{ BT/m}^2$ .

Аналогично были проведены экспериментальные исследования двухкамерного стеклопакета (табл. 2).

Таблица 2 Теплофизические свойства двухкамерного стеклопакета (4—10—4—10—4)

δ,	$t_{\rm cp}$ ,	$\Delta t$ ,	$t_{\scriptscriptstyle \mathrm{H}},$	$t_{\mathrm{x}}$ ,	λ,	R,	q,
MM	°C	°C	$^{\circ}\mathrm{C}$	°C	$B_T/(M \cdot {}^{\circ}C)$	$(M^2 \cdot K)/BT$	$BT/M^2$
	15	20	25	5	0,116	0,275	72,5
	17,5	15	25	10	0,12	0,266	56,2
	18	14	25	11	0,119	0,268	52
	19	16	27	11	0,12	0,266	60
	20	10	25	15	0,123 0,26		38,4
	20	18	29	11	0,121 0,264		68,1
32	22	6	25	19	0,128	0,25	24,9
	22	8	26	18	0,127	0,251	32,1
	22,5	25	35	10	0,124	0,258	96,9
	25	12	31	19	0,129	0,248	48,3
	27,5	17	36	19	0,131	0,244	69,6
	30	22	41	19	0,133	0,24	91,5
	32,5	27	46	19	0,136	0,235	114,7

На рис. 4 приведены значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  от средней температуры  $t_{\rm cp}$  двухкамерного стеклопакета.

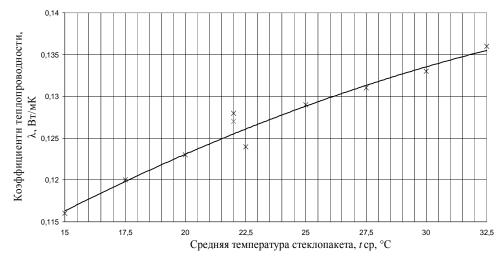


Рис. 4. Экспериментальные распределения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  от средней температуры  $t_{\rm cp}$  двухкамерного стеклопакета (4—10—4—10—4)

По результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод, что с возрастанием средней температуры  $t_{\rm cp}$  стеклопакета от 15 до 32,5 °C коэффициент теплопроводности  $\lambda$  увеличивается на 17,2 %. Так, например, при средней температуре стеклопакета  $t_{\rm cp} = 15$  °C коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0.116~{\rm Br/(M\cdot ^{\circ}C)}$ , а при средней температуре стеклопакета  $t_{\rm cp} = 32.5$  °C коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0.136~{\rm Br/(M\cdot ^{\circ}C)}$ .

На рис. 5 приведены значения коэффициента термического сопротивления теплопроводности R от средней температуры  $t_{\rm cp}$  двухкамерного стеклопакета.

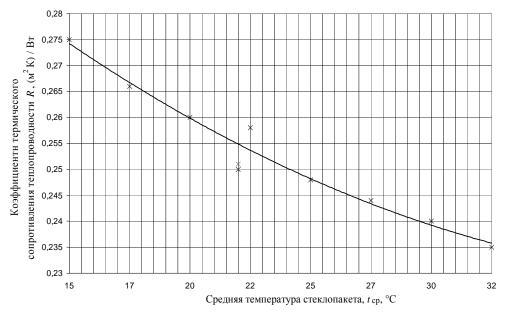


Рис. 5. Экспериментальные распределения коэффициента термического сопротивления теплопроводности R от средней температуры  $t_{\rm cp}$  двухкамерного стеклопакета (4—10—4—10—4)

По результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод, что с возрастанием средней температуры  $t_{\rm cp}$  стеклопакета от 15 до 32,5 °C коэффициент термического сопротивления теплопроводности уменьшается на 14,5 %. Так, например, при средней температуре стеклопакета  $t_{\rm cp} = 15$  °C коэффициент термического сопротивления теплопроводности  $R = 0,275~({\rm m}^2\cdot{\rm K})/{\rm BT}$ , а при средней температуре стеклопакета  $t_{\rm cp} = 32,5$  °C коэффициент термического сопротивления теплопроводности  $R = 0,235~({\rm m}^2\cdot{\rm K})/{\rm BT}$ .

На рис. 6 приведены значения плотности теплового потока q от разницы температур  $\Delta t$  двухкамерного стеклопакета (4—10—4—10—4).

По результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод, что с возрастанием разности температуры  $\Delta t$  стеклопакета от 6 до 27 °C плотность теплового потока q увеличивается на 360,6 %. Так, например, при разности температур стеклопакета  $\Delta t=6$  °C плотность теплового потока q=24,9 Вт/м², а при разности температур стеклопакета  $\Delta t=25$  °C плотность теплового потока q=114,7 Вт/м².

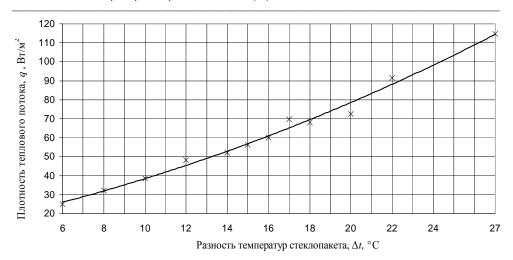


Рис. 6. Экспериментальные распределения плотности теплового потока q от разности температур  $\Delta t$  двухкамерного стеклопакета (4—10—4—10—4)

Средние значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , термического сопротивления теплопроводности R и плотности теплового потока q в интервале значений температур нагревателя  $t_{\rm H}=25...46$  °C и холодильника  $t_{\rm X}=5...20$  °C приведены в табл. 3.

Таблица 3 Средние значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , термического сопротивления теплопроводности R и плотности теплового потока q в интервале значений температур нагревателя  $t_{\rm H}=25...46~{\rm ^{\circ}C}$  и холодильника  $t_{\rm x}=5...20~{\rm ^{\circ}C}$ 

Свойства стеклопакета Вид стеклопакета	$\lambda_{cp}$ , BT/(M·°C)	$R_{\rm cp}$ , $({ m m}^2 \cdot { m K})/{ m B}_{ m T}$	$q_{ m cp},{ m BT/m}^2$
Однокамерный	0,167	0,144	103,7
Двухкамерный	0,125	0,256	63,5

Сравнивая полученные экспериментальные данные однокамерного (4—16—4) и двухкамерного (4—10—4—10—4) стеклопакетов, можно сделать вывод [3, 4]:

средний коэффициент теплопроводности  $\lambda$  однокамерного стеклопакета на 25,1 % больше двухкамерного;

средний коэффициент термического сопротивления теплопроводности R однокамерного стеклопакета на 77,8 % меньше двухкамерного;

средняя плотность теплового потока q однокамерного стеклопакета на 38,8 % больше двухкамерного.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов : пат. на изобретение № 2421711 / В. М. Фокин, А. В. Ковылин.
- 2. Фокин В. М., Ковылин А. В. Определение теплофизических свойств ограждающих конструкций зданий методом неразрушающего контроля с использованием электронного измерителя плотности тепловых потоков ИТП-МГ 4.03 «Поток» // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика: матер. 66-й Всерос. науч.-техн. конф. по итогам НИР университета за 2008 г. Самара: СГАСУ, 2009. С. 273—275.

- 3. Фокин В. М., Ковылин А. В. Теоретические основы определения теплопроводности, объемной теплоемкости и температуропроводности материалов по тепловым измерениям на поверхности методом неразрушающего контроля // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер: Стр-во и архит. 2009. Вып. 14(33). С. 123—127.
- 4. Ковылин А. В., Фокин В. М. Определение теплотехнических свойств оконного стекла для ограждений зданий // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2011. Вып. 21(40). С. 124—127.
- 1. Sposob nerazrushayushchego kontrolya kompleksa teplofizicheskikh kharakteristik tverdykh stroitel'nykh materialov : pat. na izobretenie № 2421711 / V. M. Fokin, A. V. Kovylin.
- 2. Fokin V. M., Kovylin A. V. Opredelenie teplofizicheskikh svoystv ograzhdayushchikh konstruktsiy zdaniy metodom nerazrushayushchego kontrolya s ispol'zovaniem elektronnogo izmeritelya plotnosti teplovykh potokov ITP-MG 4.03 «Potok» // Aktual'nye problemy v stroitel'stve i arkhitekture. Obrazovanie. Nauka. Praktika: mater. 66-y Vseros. nauch.-tekhn. konf. po itogam NIR universiteta za 2008 g. Samara: SGASU, 2009. S. 273—275.
- 3. Fokin V. M., Kovylin A. V. Teoreticheskie osnovy opredeleniya teploprovodnosti, ob"emnoy teploemkosti i temperaturoprovodnosti materialov po teplovym izmereniyam na poverkhnosti metodom nerazrushayushchego kontrolya // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser: Str-vo i arkhit. 2009. Vyp. 14(33). S. 123—127.
- 4. Kovylin A. V., Fokin V. M. Opredelenie teplotekhnicheskikh svoystv okonnogo stekla dlya ograzhdeniy zdaniy // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2011. Vyp. 21(40). S. 124—127.

© Фокин В. М., Ковылин А. В., Попова А. В., 2014

Поступила в редакцию в феврале 2014 г.

#### Ссылка для цитирования:

Фокин В. М., Ковылин А. В., Попова А. В. Экспериментальное исследование энергоэффективности стеклопакета для ограждений зданий // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 189—195.

УДК 536.24

#### В. М. Фокин, А. В. Попова, А. В. Ковылин

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СТЕКЛОПАКЕТА С ТЕПЛОЗАЩИТНЫМИ ПЛЕНКАМИ

Приведены исследования двухкамерного стеклопакета с различными вариантами нанесения на стекла теплозащитного покрытия — пленки. Рассмотрено влияние применения теплозащитной пленки на теплофизические свойства стеклопакета. Приведены сравнения среднего коэффициента теплопроводности, среднего термического сопротивления теплопроводности и средней плотности теплового потока двухкамерного стеклопакета с теплозащитными пленками и без них.

К л ю ч е в ы е с л о в а: энергоэффективность стеклопакета, двухкамерный стеклопакет, теплозащитная пленка, плотность теплового потока, коэффициент теплопроводности, термическое сопротивление теплопроводности.

The article provides the studies of double-glazed window with various ways of drawing of heat-shielding coating: the film. The authors consider the impact of the application of heat-shielding film on the thermo-physical properties of glass. The comparison of the average coefficient of thermal conductivity, the average thermal resistance of thermal conductivity and the average density of the heat flow of double-glazed window with heat-shielding films and without them is given.

 $K\,e\,y\,w\,o\,r\,d\,s$ : energy efficiency of a double-glazed window, double-glazed window, heat-shielding film, density of the thermal flow, thermal conductivity coefficient, thermal resistance of thermal conductivity.

Существуют различные виды стеклопакетов: однокамерные, двухкамерные, а также с различным напылением и покрытием теплозащитной пленкой. Наибольшие потери теплоты через ограждения зданий приходятся на оконные стеклопакеты. Для снижения потерь теплоты в окружающую среду от наружных ограждений зданий — оконных стеклопакетов — нужно знать теплопроводность  $\lambda$ , термическое сопротивление теплопроводности R, плотность теплового потока q [1].

Для определения теплофизических свойств были изготовлены два двух-камерных стеклопакета с различными вариантами покрытия теплозащитной пленкой (напыление): двухкамерный размерами  $250 \times 250 \times 32$  мм с расположением пленок на двух крайних стеклах (4И—10—4—10—4И) мм (рис. 1) и двухкамерный размерами  $250 \times 250 \times 32$  мм с расположением пленок на среднем и крайнем стеклах (4—10—4И—10—4И) (рис. 2). Двухкамерный стеклопакет имеет три стекла толщиной 4 мм и зазорами 10 мм.

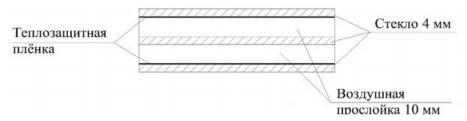


Рис. 1. Схема двухкамерного стеклопакета с расположением пленок на двух крайних стеклах (4И—10—4—10—4И)

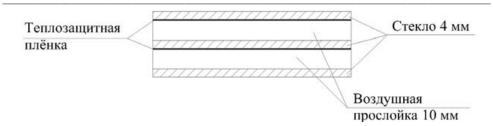


Рис. 2. Схема двухкамерного стеклопакета с расположением пленок на среднем и крайнем стеклах (4—10—4И—10—4И)

Стеклопакеты с энергосберегающими стеклами с низкоэмиссионным покрытием пропускают видимый свет почти как обычное стекло, но способны отражать обратно в помещение большую часть теплового излучения, а стекла называют «И-стекла».

Для определения теплофизических свойств оконных стеклопакетов использовался измеритель теплопроводности ИТП-МГ4-250. Заводской прибор — измеритель теплопроводности ИТП-МГ4-250 (размер испытываемого образца  $250\times250$  мм, толщина 5...50 мм) предназначен для определения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  и термического сопротивления R твердых строительных материалов, а также материалов, предназначенных для тепловой изоляции зданий при стационарном тепловом режиме.

Задавая в приборе ИТП-МГ4-250 значения температуры холодильника  $t_{\rm x}=5...10$  °C и нагревателя  $t_{\rm H}=25$  °C, получили различные значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , термического сопротивления теплопроводности R и плотности теплового потока q двухкамерного стеклопакета с различными вариантами нанесения теплоизоляционной пленки: 4И-10-4U-10-4U и 4-10-4U-10-4U [2, 3].

В табл. 1 приведены полученные экспериментальные значения теплофизических свойств двухкамерного стеклопакета с теплозащитными пленками на двух крайних стеклах (4И—10—4—10—4И).

Таблица 1 Теплофизические свойства двухкамерного стеклопакета с теплозацитными пленками на двух крайних стеклах (4И—10—4—10—4И)

δ, мм	t <sub>cp</sub> , °C	Δt, °C	t <sub>H</sub> , °C	t <sub>x</sub> , °C	$\lambda$ , BT/(M·°C)	$R$ , ( $M^2 \cdot K$ )/BT	q, Bt/m <sup>2</sup>
22	15	20	25	5	0,047	0,68	29,4
32	17,5	15	25	10	0,047	0,68	22

Средняя температура стеклопакета определяется по формуле

$$t_{\rm cp} = (t_{\rm H} - t_{\rm X}) / 2,$$

где  $t_{\rm H}$  — температура нагревателя, °C;  $t_{\rm X}$  — температура холодильника, °C. Разность температур стеклопакета определяется по формуле

$$\Delta t = t_{\rm H} - t_{\rm X}$$
.

Аналогично были проведены экспериментальные исследования двухкамерного стеклопакета с теплозащитными пленками на среднем и крайнем стеклах (4—10—4И—10—4И). Для определения теплофизических свойств стеклопакетов с теплозащитными пленками были проведены исследования с расположением теплозащитных пленок в двух вариантах по отношению к нагревателю и холодильнику:

- а) пленки на стеклах расположены со стороны нагревателя;
- б) пленки на стеклах расположены со стороны холодильника.

Пример расположения двухкамерного стеклопакета с теплозащитными пленками на среднем и крайнем стеклах в приборе ИТП-МГ4-250 приведен на рис. 3 (положение «а»).

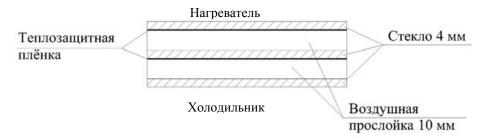


Рис. 3. Схема расположения двухкамерного стеклопакета с теплозащитными пленками на среднем и крайнем стеклах (4—10—4И—10—4И) в приборе ИТП-МГ4-250 (положение «а»)

В табл. 2 приведены полученные экспериментальные значения теплофизических свойств двухкамерного стеклопакета с теплозащитными пленками на среднем и крайнем стеклах (положение «а»).

Таблица 2 Теплофизические свойства двухкамерного стеклопакета с теплозацитными пленками на среднем и крайнем стеклах (4—10—4И—10—4И) (положение «а»)

δ, мм	t <sub>cp</sub> , °C	Δt, °C	t <sub>н</sub> , °C	t <sub>x</sub> , °C	, °C $\lambda$ , BT/(M·°C) $R$ , (M²·K)/BT		q, Bt/m <sup>2</sup>
32	15	20	25	5	0,067	0,477	41,9
32	17,5	15	25	10	0,068	0,47	31,9

Пример другого расположения стеклопакета — с теплозащитными пленками на среднем и крайнем стеклах — в приборе ИТП-МГ4-250 приведен на рис. 4 (положение «б»).

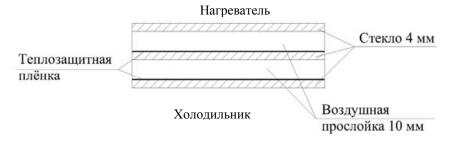


Рис. 4. Схема расположения двухкамерного стеклопакета с теплозащитными пленками на среднем и крайнем стеклах (4—10—4И—10—4И) в приборе ИТП-МГ4-250 (положение «б»)

В табл. 3 приведены полученные экспериментальные значения теплофизических свойств двухкамерного стеклопакета с теплозащитными пленками на среднем и крайнем стеклах (положение «б»).

Таблица 3 Теплофизические свойства двухкамерного стеклопакета с теплозацитными пленками на среднем и крайнем стеклах (4—10—4И—10—4И) (положение «б»)

δ, <sub>MM</sub>	t <sub>cp</sub> , °C	Δt, °C	t <sub>н</sub> , °C	t <sub>x</sub> , °C	$λ$ , Bt/( $M \cdot {}^{\circ}C$ )	$R$ , ( $M^2 \cdot K$ )/BT	q, Bt/m <sup>2</sup>
32	15	20	25	5	0,064	0,5	40
32	17,5	15	25	10	0,065	0,492	30,4

Средние значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , термического сопротивления теплопроводности R и плотности теплового потока q двухкамерного стеклопакета с теплозащитной пленкой и без пленки приведены в табл. 4 [4].

Таблица 4 Средние значения коэффициента теплопроводности д, термического сопротивления теплопроводности R и плотности теплового потока q двухкамерного стеклопакета

Свойства стеклопакета Вид стеклопакета	$\lambda_{cp}$ , BT/(M·°C)	$R_{\rm cp}$ , ( ${ m M}^2{\cdot}{ m K}$ )/BT	$q_{\rm cp},{ m BT/M}^2$
Двухкамерный без пленки (4—10—4—10—4)	0,125	0,256	63,5
Двухкамерный с пленкой (4И—10—4—10—4И)	0,047	0,68	25,7
Двухкамерный с пленкой (4—10—4И—10—4И) (положение «а»)	0,0675	0,4735	36,9
Двухкамерный с пленкой (4—10—4И—10—4И) (положение «б»)	0,0645	0,496	35,2

Сравнивая полученные экспериментальные данные двухкамерных стеклопакетов с теплозащитной пленкой и без нее, можно сделать выводы:

- 1. Наименьший коэффициент теплопроводности  $\lambda_{cp}=0.047~\mathrm{Bt/(m\cdot^{\circ}C)}$  имеет двухкамерный стеклопакет с пленкой на двух крайних стеклах (4И—10—4—10—4И), что почти в три раза (в 2,66 раза) меньше коэффициента теплопроводности двухкамерного стеклопакета без пленки (4—10—4—10—4).
- 2. Самое высокое значение коэффициента термического сопротивления теплопроводности  $R_{\rm cp}=0.68~({\rm m}^2\cdot{\rm K})/{\rm BT}$  имеет двухкамерный стеклопакет с пленкой на двух крайних стеклах (4И—10—4—10—4И), что в 2,66 раза больше коэффициента теплопроводности двухкамерного стеклопакета без пленки (4—10—4—10—4).
- 3. Плотность теплового потока наибольшая в двухкамерном стеклопакете без пленки (4—10—4—10—4), что в 2,47 раза больше, чем плотность теплового потока двухкамерного стеклопакета с пленкой на двух крайних стеклах (4И—10—4—10—4И).
- 4. Однако необходимо учитывать, что стоимость низкоэмиссионного стекла И  $(20...25 \text{ y. e./m}^2)$  в два раза превышает цену обычного стекла  $(8...12 \text{ y.e./m}^2)$ .

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов : пат. на изобретение № 2421711 / В. М. Фокин, А. В. Ковылин.
- 2. Фокин В. М., Ковылин А. В. Определение теплофизических свойств ограждающих конструкций зданий методом неразрушающего контроля с использованием электронного измерителя плотности тепловых потоков ИТП-МГ 4.03 «Поток» // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика: материалы 66-й Всерос. науч.-техн. конф. по итогам НИР университета за 2008 г. Самара: СГАСУ, 2009. С. 273—275.
- 3. Фокин В. М., Ковылин А. В. Теоретические основы определения теплопроводности, объемной теплоемкости и температуропроводности материалов по тепловым измерениям на поверхности методом неразрушающего контроля // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер: Стр-во и архит. 2009. Вып. 14(33). С. 123—127.
- 4. Ковылин А. В., Фокин В. М. Определение теплотехнических свойств оконного стекла для ограждений зданий // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2011. Вып. 21(40). С. 124—127.
- 1. Sposob nerazrushayushchego kontrolya kompleksa teplofizicheskikh kharakteristik tverdykh stroitel'nykh materialov : pat. na izobretenie № 2421711 / V. M. Fokin, A. V. Kovylin.
- 2. Fokin V. M., Kovylin A. V. Opredelenie teplofizicheskikh svoystv ograzhdayushchikh konstruktsiy zdaniy metodom nerazrushayushchego kontrolya s ispol'zovaniem elektronnogo izmeritelya plotnosti teplovykh potokov ITP-MG 4.03 «Potok» // Aktual'nye problemy v stroitel'stve i arkhitekture. Obrazovanie. Nauka. Praktika: matererialy 66-y Vseros. nauch.-tekhn. konf. po itogam NIR universiteta za 2008 g. Samara: SGASU, 2009. S. 273—275.
- 3. Fokin V. M., Kovylin A. V. Teoreticheskie osnovy opredeleniya teploprovodnosti, ob"emnoy teploemkosti i temperaturoprovodnosti materialov po teplovym izmereniyam na poverkhnosti metodom nerazrushayushchego kontrolya // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser: Str-vo i arkhit. 2009. Vyp. 14(33). S. 123—127.
- 4. Kovylin A. V., Fokin V. M. Opredelenie teplotekhnicheskikh svoystv okonnogo stekla dlya ograzhdeniy zdaniy // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2011. Vyp. 21(40). S. 124—127.

© Фокин В. М., Попова А. В., Ковылин А. В., 2014

Поступила в редакцию в феврале 2014 г.

#### Ссылка для цитирования:

Фокин В. М., Попова А. В., Ковылин А. В. Экспериментальное исследование энергоэффективности стеклопакета с теплозащитными пленками // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 196—200.

УДК 536.24

# В. М. Фокин, Д. Г. Усадский, Н. В. Иванищева

### КОНЦЕПЦИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК

Приведен анализ возможности повышения эффективности тепловых установок для утилизации вторичных энергетических ресурсов теплоэнергетических систем зданий и сооружений.

К л ю ч е в ы е  $\,$  с л о в а: вторичные энергетические ресурсы, энергетические системы, тепловые насосы.

The authors provide the analysis of the possibilities of increase of efficiency of heat units for the disposal of secondary energy resources of heat and power systems and constructions.

Key words: secondary energy resources, energy systems, heat pumps.

Энергетическая политика Российской Федерации направлена на повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов и переход экономики на путь энергосбережения.

Глубокая и полная утилизация вторичных энергоресурсов в настоящее время является наиболее действенным методом повышения эффективности топливно-энергетических комплексов и хозяйств различных предприятий и организаций. Использование вторичных энергоресурсов в ближайшие годы будет оставаться одним из важнейших мероприятий по рациональному использованию энергии.

При постоянно повышающихся ценах на энергетические ресурсы создание установок по использованию вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) в 2...3 раза меньше затрат на добычу эквивалентного количества топлива. Утилизация ВЭР позволяет экономить другие виды ресурсов и вспомогательных материалов.

Для расширения масштабов использования вторичных энергоресурсов необходима разработка новых способов утилизации и определение потенциалов энергосбережения при эксплуатации различного оборудования.

В общем виде вторичными энергоресурсами являются химически и физически связанная теплота, потенциальная энергия избыточного давления, содержащиеся в продукции, отходах, промежуточных продуктах [1].

Для характеристики ВЭР и оценки возможного потенциала их использования применяются показатели коэффициента выхода ВЭР, коэффициента утилизации ВЭР. Для разработки типовых приемов сокращения энергопотребления предприятий и производств ВЭР классифицируют по 3 видам: горючие, тепловые и избыточного давления. Горючие ВЭР содержат химически связанную энергию, которую возможно использовать в качестве топлива. Тепловые ВЭР составляют физическую теплоту уходящих газов технологических агрегатов, теплогенерирующих установок, горячей воды и пара, удаляемого воздуха в системах вентиляции и аспирации.

На долю тепловых вторичных энергетических ресурсов приходится более 60% потенциала энергосбережения. К газообразным низкотемпературным ВЭР относят уходящие дымовые газы и вентиляционные выбросы.

Активное применение теплонасосных установок для уменьшения доли потребления органического топлива ведется уже на протяжении более 30 лет и с каждым годом только расширяется. Интерес к внедрению тепловых насосов и теплонасосных установок определен возможностью утилизации рассеянной теплоты естественного или техногенного происхождения, высоким коэффициентом преобразования энергии, достигающим значений 3±5. Наибольшее распространение получили тепловые насосы парокомпрессионного и сорбционного типов.

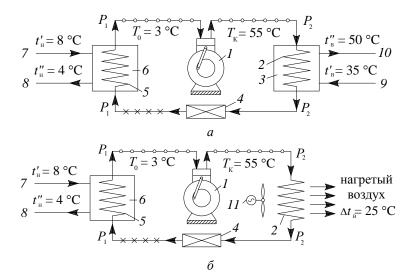
Теплонасосные установки (ТНУ) используют естественную возобновляемую низкопотенциальную тепловую энергию окружающей среды (воды, воздуха, грунта) и повышают потенциал основного теплоносителя до более высокого уровня, затрачивая при этом в несколько раз меньше первичной энергии или органического топлива [2]. Теплонасосные установки работают по термодинамическому циклу Карно, при котором рабочей жидкостью служат низкокипящие жидкости (аммиак, фреон и др.). Перенос теплоты от источника низкого потенциала на более высокий температурный уровень осуществляется подводом механической энергии в компрессоре (парокомпрессионные ТНУ) или дополнительным подводом теплоты (в абсорбционных ТНУ).

Применение ТНУ в системах теплоснабжения — одно из важнейших пересечений техники низких температур с теплоэнергетикой, приводит к энергосбережению невозобновляемых источников энергии и защите окружающей среды за счет сокращения выбросов  ${\rm CO_2}$  и  ${\rm NO_x}$  в атмосферу. Применение ТНУ весьма перспективно в комбинированных системах теплоснабжения в сочетании с другими технологиями использования возобновляемых источников энергии (солнечной, ветровой, биоэнергии) и позволяет оптимизировать параметры сопрягаемых систем и достигать наиболее высоких экономических показателей.

По конструкции, принципу действия, составу оборудования, используемым рабочим телам ТНУ практически не отличаются от широко распространенных холодильных машин. Тепловые насосы в сравнении с холодильными машинами работают в диапазоне более высоких рабочих температур. Особенно выгодно применение тепловых насосов (ТН) при одновременной выработке теплоты и холода, что может быть реализовано в ряде промышленных и сельскохозяйственных производств, а также в системах кондиционирования воздуха.

Выберем в качестве рабочего хладагента R 401, имеющий следующие параметры: расход хладагента  $G_{\rm a}=0.06$  кг/с; температура кипения  $T_{\rm 0}=3$  °C; температура конденсации  $T_{\rm K}=55$  °C; температура теплоносителя на входе в испаритель от источника низкого потенциала  $t'_{\rm H}=8$  °C; температура теплоносителя (воды) на выходе из конденсатора  $t''_{\rm B}=50$  °C; расход теплоносителя в конденсаторе  $G_{\rm K}=0.25$  кг/с; перепад температур теплоносителя в конденсаторе  $\Delta t_{\rm B}=15$  °C; мощность, потребляемая компрессором,  $N_{\rm 9}=3.5$  кВт; теплопроизводительность ТНУ  $Q_{\rm TH}=15.7$  кВт; коэффициент преобразования  $\mu_{\rm TH}=4.5$ .

Принципиальная схема парокомпрессионной ТНУ приведена на рис. и включает испаритель, компрессор, конденсатор и дроссель.



В бак испарения 6 поступает тепловая энергия низкого потенциала  $Q_0$  из окружающей среды при  $t_{\rm H}'=8$  °C. Преобразование рабочей жидкости R 401 (аммиака или фреона) теплового насоса в пар происходит в змеевике испарения хладагента 5 при пониженном давлении  $P_1$  и пониженной температуре  $T_0=3$  °C. Компрессор I всасывает из испарителя насыщенный пар со степенью сухости  $x_1\approx 1$  и сжимает пар до давления  $P_2$ . При сжатии хладагента энтальпия i и температура пара повышается до  $T_{\rm k}=55$  °C, а затрачиваемая работа  $Al=\Delta i$ , кДж/кг.

Пар с температурой  $T_{\rm k} = 55$  °C подается в змеевик конденсации хладагента 2, где тепловая энергия пара передается другому теплоносителю (воде) бака конденсации 3 (схема a) или воздуху (схема  $\delta$ ), после чего пар конденсируется при неизменном давлении  $P_2$ .

Коэффициент трансформации этого идеального цикла:

$$\mu_c = q_K / Al = T_K / (T_K - T_0) = 328 / (328 - 276) = 6.3,$$

где  $q_{\kappa}$  — теплота конденсации, кДж/кг; Al — работа сжатия, кДж/кг;  $T_{\kappa}$  и  $T_0$  — температуры конденсации и испарения хладагента, °C.

В дроссельном клапане 4 происходит понижение давления от  $P_2$  до  $P_1$ , жидкий хладагент частично испаряется, и образуется парожидкостная смесь со степенью сухости  $x_0 \approx 0.05$ , а в процессе дросселирования (при i = const) температура хладагента снижается от  $T_{\kappa} = 55$  °C до  $T_0 = 3$  °C. Парожидкостная смесь поступает в змеевик испарения хладагента 5, где, получая теплоту от источника с низким потенциалом, вновь испаряется, и цикл повторяется.

Таким образом, в ТНУ реализуется непрерывный круговой процесс переноса теплоты с более низкого температурного уровня на более высокий (к теплоносителю). Для этого подводится энергия извне, которая затрачивается на повышение давления парообразного рабочего вещества (хладагента), причем затраченная энергия может быть электрическая, тепловая и любая другая.

Количество теплоты, отнятой от источника с низким потенциалом (НИЭ), в идеальном цикле ТНУ равно теплоте испарения жидкого хладагента, поступившего в испаритель:  $q_{\rm u} = r(x_1 - x_0)$ , кДж/кг, где r — теплота парообразования. Холодильный коэффициент этого цикла

$$\varepsilon_{\rm c} = q_{\rm H}/Al = T_0/(T_{\rm K} - T_0) = 276/(328 - 276) = 5.3,$$

где  $q_{\rm u}$  — теплота испарения хладагента, кДж/кг.

Для идеального (теоретического) цикла ТНУ и без учета потерь теплоты выполняется соотношение  $\mu_c = \epsilon_c + 1$ .

Мерой энергетической эффективности реальной ТНУ служит коэффициент преобразования энергии  $\mu_{\text{TH}}$ , характеризующий отношение отданной потребителю теплоты  $Q_{\kappa}$  к затраченной (механической или электрической) энергии  $N_3$ . Оценки показывают, что для удачно спроектированных систем теплоснабжения коэффициент  $\mu_{\text{TH}}$  изменяется от 2,5 до 6...8, а при  $\mu_{\text{TH}} > 2,5...3$  использование ТНУ может оказаться выгоднее, чем теплоснабжение от ТЭЦ и индивидуальных котельных.

Количество переданной потребителю полезной теплоты, или теплопроизводительность ТНУ, зависит от расхода теплоносителя  $G_{\kappa}$ , кг/с, средней массовой изобарной теплоемкости  $c_{\kappa}$ , кДж/(кг·К), и перепада температур  $\Delta t_{\rm B}$ , °C. Так, при нагреве воды по схеме a (см. рис.):

$$Q_{\text{K}} = G_{\text{K}} c_{\text{K}} \Delta t_{\text{B}} = 0.25.4.19.15 = 15.7 \text{ kBt.}$$

При нагреве воздуха по схеме  $\delta$  (см. рис.), когда расход холодного воздуха  $G_{\kappa}=0.5$  кг/с, теплоемкость  $c_{\kappa}=1$  кДж/(кг·К) и перепад температур  $\Delta t_{\rm B}=25$  °C, теплопроизводительность ТНУ составит

$$Q_{K} = G_{K}C_{K}\Delta t_{B} = 0.5 \cdot 1.25 = 12.5 \text{ kBt.}$$

Коэффициент преобразования энергии  $\mu_{\text{тн}}$ , характеризующий отношение отданной потребителю теплоты  $Q_{\kappa}$  к потребляемой компрессором электрической энергии  $N_3 = 3.5$  кВт, составит соответственно:

для воды 
$$\mu_{\text{тн}} = Q_{\text{\tiny K}}/N_{\text{\tiny K}} = 15,7/3,5 = 4,5;$$
 для воздуха  $\mu_{\text{тн}} = Q_{\text{\tiny K}}/N_{\text{\tiny K}} = 12,5/3,5 = 3,6.$ 

Следовательно, если на механическую работу компрессора расходуется 1 кВт электроэнергии, то в систему теплоснабжения передается 4,5 кВт теплоты, то есть в несколько раз больше, чем при чисто электрическом отоплении. Работа электрического компрессора теплового насоса позволяет потреблять в несколько раз меньше электрической энергии, чем если бы нагревали теплоноситель системы теплоснабжения в теплообменнике простым электрическим нагревателем.

Парокомпрессионные тепловые насосы (ПТН) с приводом от теплового двигателя (газовой турбины или дизельного агрегата) оказываются еще более экономичными. Хотя КПД этих двигателей не превышает 35 %, при работе в составе ТНУ может быть утилизирована и направлена в общий поток

нагреваемой ТНУ среды большая часть потерь, которые воспринимаются охлаждающей двигатель жидкостью и выхлопными газами. В результате коэффициент использования первичной энергии привода возрастает в 1,5 раза, а экономичность ТНУ обеспечивается при  $\mu_{\text{тн}} > 2$ .

В условиях реальной рыночной экономики тепловые насосы имеют перспективу теплоэнергоснабжения в основных областях хозяйства: жилищнокоммунальном секторе, на промышленных предприятиях, в курортнооздоровительных и спортивных комплексах, сельскохозяйственном производстве.

Повышение эффективности работы тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов [3] возможно за счет интенсификации теплопередачи в испарителе. Это возможно путем разработки новых конструкций работы теплообменных аппаратов, устанавливаемых в качестве испарителя. Также возможна разработка новых подходов с учетом передачи теплоты при граничных условиях I и III рода. Например: 1) установка теплообменной части испарителя теплового насоса в каналах различного назначения (вентиляционные выбросы, топочные газы, горячая вода, пар, конденсат и т. п.); 2) установка теплообменной части испарителя в толще поверхности земли.

При использовании вторичных энергетических ресурсов совместно с применением теплонасосных установок возможно эффективно решать задачи энергосбережения в различных теплоэнергетических системах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Данилов О. Л., Мунц В. А. Использование вторичных энергетических ресурсов. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. 154 с.
- 2. Фокин В. М. Теплогенерирующие установки систем теплоснабжения. М. : Машиностроение-1, 2006. 240 с.
- 3. Фокин В. М., Бодрова Е. В. Геотермальные устройства в системах теплоснабжения. Волгоград : ВолгГАСУ, 2011. 100 с.
- 1. Danilov O. L., Munts V. A. Ispol'zovanie vtorichnykh energeticheskikh resursov. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2008. 154 s.
- 2. Fokin V. M. Teplogeneriruyushchie ustanovki sistem teplosnabzheniya. M. : Mashinostroenie-1, 2006. 240 s.
- 3. *Fokin V. M., Bodrova E. V.* Geotermal'nye ustroystva v sistemakh teplosnabzheniya. Volgograd : VolgGASU, 2011. 100 s.

© Фокин В. М., Усадский Д. Г., Иванищева Н. В., 2014

Поступила в редакцию в феврале 2014 г.

Ссылка для цитирования:

 $\Phi$ окин В. М., Усадский Д. Г., Иванищева Н. В. Концепция повышения эффективности теплонасосных установок // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 201—205.

# ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 628.312.2

Е. В. Москвичева, Э. П. Доскина, А. В. Москвичева, Т. А. Кузьмина, М. А. Самойленко

# ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, СНИЖАЮЩИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Представлены результаты исследований по выявлению факторов, снижающих эффективность используемых технологий очистки сточных вод машиностроительных предприятий.

Ключевые слова: водоотведение, очистка, сточные воды, предприятия машино-строительной отрасли.

The results of the researches on identification of the factors reducing the efficiency of the used technologies of waste water treatment of machine-building enterprises are presented.

 $K\,e\,y\,$  words: wastewater disposal, waste water treatment, waste water, enterprises of machine-building branch.

Проблема использования воды в машиностроении актуальна во всем мире. Для этой отрасли характерны высокие значения объемов водопотребления и степени загрязнения производственных сточных вод токсичными веществами, такими как ионы тяжелых металлов, многоядерные органические вещества, нитрит-ионы. Основные источники загрязнения — процессы гальванопроизводства и металлообработки, являющиеся обязательными технологическими циклами сложного комплекса машиностроительного предприятия.

В отечественной и зарубежной науке вопросам обезвреживания сточных вод обозначенных производств уделяется большое внимание. Достигнутые результаты показали, что единственным рациональным решением проблемы является создание замкнутых систем водоснабжения (ЗСВ), которые, став неотъемлемой составной частью основного производства, смогут максимально обеспечить ресурсосбережение отрасли.

На многих предприятиях машиностроения была предпринята попытка в ходе плановых реконструкций перейти на 3СВ, но очищенная вода по техническим характеристикам (жесткость, минерализация, рН), имея концентрации загрязнителей, соответствующие нормам, не смогла быть использована в технологических циклах. Отмечены были интересные факторы: очищенная вода меняла численные значения жесткости, рН в зависимости от температуры, среды, скорости перемешивания потока и т. д.

За основу взято изучение качественного, количественного состава молекул соединений-загрязнителей, содержащих ионы тяжелых металлов. Исследования проводились на модельных растворах на протяжении 12 месяцев.

Для исключения влияния на измеряемые величины сезонных скачков температуры, объемов технологических электролитов обрабатывались значения, полученные ежемесячно в течение года и далее брались усредненные числа.

В результате исследований выбраны 4 предприятия машиностроения Волгоградской и Астраханской областей с водопотреблением более 400 тыс. м<sup>3</sup>, не применяющие в гальванопроизводстве электролиты с цианид-ионами, использующие в металлообработке водосмешиваемые смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) на эмульсоле с индустриальным маслом ИД-20 [1].

Анализ собранных данных показал: образующиеся сточные воды основного производства машиностроительных предприятий (76 % водопотребления всего предприятия) не могут повторно использоваться; применяемый повсеместно реагентный метод необходимо усовершенствовать или заменить более технологичным [2]. Поэтому представляло интерес выявить факторы, снижающие эффективность очистки рассматриваемых сточных вод с целью определения способа водосбережения.

Известно, что сточные воды гальванического производства загрязняются прежде всего технологическими растворами — электролитами, химический состав которых (результат многолетних поисков научных школ по электрохимии) должен обеспечивать при электроосаждении образование качественных металлических покрытий; это достигается, как правило, на основе комплексных соединений в присутствии различных органических веществ-добавок. Поэтому в гальваностоках ионы тяжелых металлов прежде всего по этой причине находятся в составе комплексных ионов, о чем свидетельствуют полученные данные (табл. 1), где показано несоответствие значений концентраций ионов металлов, взятых для реализации реагентного метода, и истинных, так как ионызагрязнители входят в состав молекулярных комплексных структур в «связанном виде», что затрудняет их участие в процессе осаждения.

Таблица 1 Усредненный химический состав гальваностоков до и после очистки реагентным методом

Кат	гионы, мг/л	$Cd^{2+}$	Cr <sup>2+</sup>	Сгобщ	$Zn^{2+}$	Ni <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Fe <sub>общ</sub>	NH <sup>+</sup>
До	свободные ионы	2,45	0,5	2,1	10	42	35,95	28,5	100
очистки	связанные ионы	66,2	13,2	54,0	270,0	1134,0	1178	769,0	2700,0
После	свободные ионы	0,06	0,37	1,125	7,5	31,5	27	21,4	75
очистки связанные ионы		54,01	11,0	44,8	221,0	930,0	966,0	631,0	2214,0
пдк		0,005	0,02	0,07	0,01	0,01	0,001	0,1	0,5
Ан	ионы, мг/л	$\mathbf{F}^{-}$	$NO_3^-$	Cl <sup>-</sup>	$SO_4^{2-}$	$PO_4^{3-}$			
До	свободные ионы	5,45	12,7	68	4465	90			_
очистки	связанные ионы	5,45	387,0	1336,0	1800,0	1230,0			_
После	свободные ионы	4,1	9,5	51	3349	68			
очистки	связанные ионы	4,1	290,0	1100,0	1580,0	1010,0			
	ПДК	0,05	40	300	100	2,0			_

Одновременно получены доказательства, подтверждающие наличие 3-х устойчивых фонов: анионного, катионного, органического, которые усиливают процесс образования комплексных соединений в сточных водах машиностроительных предприятий.

Таблица 2

Физико-химические свойства реальных и модельных растворов

	Overa	- vana rocka	c cocacinoa l	canonois a.	Fasano-nama techae cooacinoa peanonon a moochonon parmoopoo	acmochoo			
Ŋ.	Состав растворов, мг/л	онтопП	Плотность, г/см³	Вязкос	Вязкость, Па·с	Поверх натяжен	Поверхностное натяжение, мН/м	Удел электропр см	Удельная электропроводность, см/м
11/11		oΥ	После	ď	После	о∐	После	До	После
		очистки	очистки	очистки	очистки	очистки	очистки	очистки	ОЧИСТКИ
1	2	8	4	2	9	L	8	6	10
-	Doort Hill moomoon (mogn. 1)	1,37	1,225	1,24	1,08	73	70	18,2	14,6
٦	геальный раствор (таол. 1)	$\Delta = 1$	$\Delta = 10,5$ %	$=\nabla$	$\Delta = 12\%$	$=\nabla$	$\Delta = 4 \%$	$\delta = 0$	$\Delta = 8,84$ %
C	Модельный раствор, состав: 105 мг ${\rm CrO}_3 + {\rm H}_2 {\rm SO}_4$ (содержит 55 мг-ионов	1,15	1,13	1,3	1,14	82	75	44	34
1	$Cr^{+6}$ ). [ $Cr_{o6m}$ ] до очистки = 55 мг/л;								
	$[Cr_{o6m}]$ после очистки = 40 мг/л	$\Delta =$	$\Delta = 2 \%$	$\Delta = 1$	$\Delta = 12,3$ %	$\Delta = 0$	$\Delta = 8.5\%$	$\Delta = \Delta$	$\Delta = 20 \%$
,	Раствор с концентрацией			1				,	
m	соответствующих ионов, равных ПДК (табл. 1)	1,(	1,005	,	0,81	9	99	6	9,3
-	Модельный раствор, состав: $5720 \text{ мг}$ NiSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O (1200 мг ионов Ni <sup>2+</sup> ); [Ni <sup>2+</sup> ]	1,12	1,007	1,26	0,83	96	89	23	9,4
t	до очистки = 1200 мг/л; после очистки								
	39 мг/л	$\Delta =$	$\Delta=12~\%$	$\Delta =$	$\Delta = 34 \%$	$\nabla = \nabla$	$\Delta = 32 \%$	$\Delta = \Delta$	$\Delta = 43\%$

Усредненный состав (мг/л): среднее значение концентраций (12 измерений — 12 месяцев): pH = 6,66...8,5 (до очистки), pH = 7,07...7,48 (после очистки), t = 10...18 °C. Органические вещества с концентрацией > 1 %: ПАВ (сульфанолы мыла), ингибиторы, декстрин, ОП-7, ОП-10, тиомочевина, ПЭПА, фталенид. Суммарная концентрация составляет 7,0 г/л.

Если в растворе отсутствует комплексообразование (раствор № 4), то в результате осаждения достигаются значения концентраций, близкие к соответствующим величинам раствора № 3 (табл. 2). В растворах № 1 и 2 (табл. 2) величина изменения показателей находится в пределах 20 %, что согласовывается со значениями показателей константы нестойкости комплексных ионов, в состав которых входят ионы тяжелых металлов — загрязнителей рассматриваемых гальваностоков: pK  $[Cu(P_2O_7)]^{2-} = 26,72$ ; pK  $[Cd(P_2O_7)]^{2-} = 18,4$ ; pK  $[Ni(H_2O)_4SO_4] = 15,34$ ; pK  $[ZnCl_4]^{2-} = 12,24$ ; pK  $[nCrO_3mH_2O] = 17,8$ . Степень диссоциации их не превышает 14...17 % и подтверждает наличие комплексных ионов. Подобный вывод можно подтвердить также значениями произведений растворимости гидроксидов соответствующих ионов:  $Cu(OH)_2$ ,  $Cd(OH)_2$ ,  $Ni(OH)_2$ ,  $Cr(OH)_3$ ,  $Zn(OH)_2$ .

Таким образом, применение реагентного метода при очистке гальваностоков несостоятельно, так как искажены истинные значения концентрации ионов тяжелых металлов: более 80 % их находится в составе слабодиссоциирующих комплексных ионов. Полученные данные легли в основу методики по определению результативности очистки рассматриваемых стоков известными методами: ионно-обменным, электролизом, гальванокоагуляцией, сорбционным и др. Установлено: эффективность метода зависит от молекулярной массы загрязнителей, величины поверхностного натяжения, электропроводности, плотности очищаемых стоков.

На основании полученных данных сформулированы технические требования к методу очистки гальваностоков до норм ПДК или ЗСВ:

- 1) независимость качества очистки сточных вод от структурного состава молекул-загрязнителей;
- 2) возможность получения очищенной воды и отдельной фракции с загрязнителями без дополнительных реагентов, предварительной подготовки исходной сточной воды.

Обосновано и экспериментально подтверждено отрицательное влияние процессов комплексообразования на глубину очистки гальваностоков методами, техническая суть которых обусловлена структурой, размерами, величиной заряда частиц-загрязнителей (электрохимические, мембранные, коагуляционные).

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Москвичев С. С., Юрко А. В., Москвичева Е. В. Способ очистки сточных вод от эмульгированных органических загрязнений // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стрво и архит. 2009. Вып. 16(35). С. 183—185.
- 2. *Москвичев С. С., Стрепетов И. В.* Получение сорбентов из алюмосиликатных отходов нефтеперерабатывающего завода // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2008. Вып. 12(31). С. 150—153.
- 1. Moskvichev S. S., Yurko A. V., Moskvicheva E. V. Sposob ochistki stochnykh vod ot emul'girovannykh organicheskikh zagryazneniy // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2009. Vyp. 16(35). S. 183—185.

2. Moskvichev S. S., Strepetov I. V. Poluchenie sorbentov iz alyumosilikatnykh otkhodov neftepererabatyvayushchego zavoda // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2008. Vyp. 12(31). S. 150—153.

© Москвичева Е.В., Доскина Э.П., Москвичева А.В., Кузьмина Т.А., Самойленко М.А., 2014

Поступила в редакцию в марте 2014 г.

# Ссылка для цитирования:

Исследование факторов, снижающих эффективность очистки сточных вод на машиностроительных предприятиях / Е. В. Москвичева, Э. П. Доскина, А. В. Москвичева, Т. А. Кузьмина, М. А. Самойленко // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 206—210.

УДК 502.17+504.03

#### М. А. Шубин

# АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРУДА-НАКОПИТЕЛЯ ОАО «ХИМПРОМ» НА КАЧЕСТВО ПОДЗЕМНЫХ ВОД, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ВОДОСНАБЖЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ

Проведены исследования возможного влияния пруда-накопителя ОАО «Химпром» на качество подземных вод хазарского водоносного горизонта. Выполнены сбор, анализ и систематизация материалов по геологическому строению и гидрогеологическим условиям территории Сарпинской низменности и хвалынской равнины в зоне расположения прудовнакопителей Южного промузла. Получены характеристики основных водоносных горизонтов, необходимые для расчета гидрогеологических параметров и оценки влияния пруда-накопителя на качество подземных вод.

K л ю ч е в ы е  $\,$  с л о в а: накопитель, сточные воды, влияние, подземные воды, водоснабжение.

Studies on the possible impact of pond «Khimprom» on groundwater quality of the Khazar aquifer are provided. Collection, analysis and systematization of materials on geology and hydrogeological conditions of the Sarpinskaya plain and Khvalynskaya plain in the zone of the Southern industrial hub storage ponds are carried out. The characteristics of the main aquifers necessary to calculate hydrogeological parameters and estimation of the effect of pond on groundwater quality were received.

Key words: pond, waste water, impact, underground water, water supply.

Климат исследуемого района резко-континентальный, характеризуется заметным контрастом между суровой зимой и знойным летом и засушливостью. Лето жаркое, средняя температура июля от 21,5 до 24,5 °C (максимальная — 40...44 °C). Зима обычно малоснежная, средняя температура января от –1 до –8 °C (минимальная –36 °C). Быстрое нарастание температур обусловливает кратковременность весны. Безморозный период наступает 10 мая и кончается 10 октября с периодическими заморозками в сентябре. Среднегодовое количество осадков 215...250 мм в год. Значительное количество осадков приходится на осенний период. Относительная влажность воздуха в зимний период достигает 80...90 %, летом же она низкая и подвержена резким колебаниям.

Специфической особенностью территории являются засухи и суховеи: летом бывает до 60 суховейных дней. Осадков выпадает мало и распределены они неравномерно как по сезонам, так и по годам. Велика испаряемость, в летнее время она превышает количество выпадающих осадков, поэтому лето засушливое.

Среднегодовая скорость ветра колеблется в пределах 5...6 м/с, но периодически бывают ураганы до 20 м/с и более, как зимой, так и летом. Преобладающее направление ветра в зимние месяцы — северо-восточное, летом — западное и юго-западное и, периодически, юго-восточное, осенью — ветры различных направлений.

Естественно-ландшафтный фон в зоне проведения исследований сильно нарушен, однако отмечено видовое разнообразие флоры и фауны, характерное для водоемов сухих степей. Растительность представлена типчаково-ковыльными

бедно-разнотравными ассоциациями в комплексе с белополынными и белополынно-ромашковыми, часто полупустынными полынно-типчаково-ковыльными образованиями в комплексе с полукустарничковыми сообществами на солонцах. На большей части территории распространены светло-каштановые почвы с пятнами солонцов, на западе — каштановые почвы, где также имеются участки с солонцами.

Рассматриваемый район примыкает к южной части Волгоградской агломерации и в географическом плане является северо-западной частью Сарпинской низменности. В свою очередь, эта низменность представляет довольно крупный юго-западный фрагмент Прикаспийской низменности, расположенный между Ергенями и Волгой и относящийся к хвалынской морской аккумулятивной равнине.

Гидрогеологические условия исследуемой территории довольно сложные. Это обусловлено структурно-тектоническими особенностями, литологофациальной изменчивостью пород, климатическими условиями. Воды четвертичных отложений приурочены ко всем четвертичным образованиям от современных до нижнечетвертичных.

Водоносный горизонт озерно-аллювиальных сарпинских отложений распространен в пределах Сарпинской низменности. Водовмещающими породами являются пески, супеси, суглинки и озерные глины. Водоупором для них служат тяжелые нетрещиноватые хвалынские шоколадные глины. Воды обычно безнапорные. Глубина залегания от 0,2...0,5 до 5...6 м.

Водоносный горизонт нижнехвалынских отложений распространен спорадически в пределах морской аккумулятивной хвалынской равнины. Формирование его связано с интенсивным инженерно-хозяйственным освоением территории, которое сопровождалось появлением искусственных источников обводнения, в том числе прудов-накопителей. Вновь сформировавшаяся верховодка в верхней трещиноватой зоне хвалынских глин с песчано-алевритовыми прослоями и в перекрывающих их песках и супесях постепенно преобразовывается в постоянный водоносный горизонт. Глубина залегания уровня грунтовых вод изменяется в широких пределах от 0,5 до 5...10 м и более.

Водоносный горизонт хазарских отложений распространен в пределах морской аккумулятивной равнины. Это наиболее водообильный и широко распространенный водоносный горизонт в Прикаспийской низменности. Кроме того, горизонт используется для водоснабжения населенных пунктов рассматриваемой территории, в связи с чем представляет значительный интерес оценка возможного загрязнения отходами из прудов-накопителей. Водовмещающими породами здесь являются пески хазарского горизонта.

В верхней части разреза хазарские пески представлены мелкозернистыми разностями, а в основании преимущественно разнозернистыми фракциями с галькой и гравием. Суммарная мощность толщи водовмещающих песков колеблется от 10 до 30 м. Водоносный горизонт перекрыт выдержанной толщей суглинков и глин ательского и хвалынского горизонтов, в связи с чем он имеет напорный характер. Высота напора в тыловой части террасы достигает 10...12 м, а в направлении к юго-востоку постепенно уменьшается и падает до нуля. Уровни вод хазарского водоносного горизонта находятся на отметках от –5 до –21 м и понижаются от области питания к Волге.

Непосредственному влиянию пруда-испарителя подвергается в первую очередь хвалынский водоносный горизонт, хотя в этих отложениях наличие постоянного водоносного горизонта не обнаружено и он не используется населением для хозяйственных нужд. В то же время влияние пруда на хазарский горизонт, который используется для водоснабжения в отдельных поселках (Дубовый Овраг, Трудолюбие), не исключается.

Расчет фильтрационного расхода из пруда-испарителя осуществляется на основе данных о климатических и гидрогеологических условиях территории, включая сведения о строении, составе и фильтрационных параметрах пород зоны аэрации. Согласно данным изысканий, в районе пруда-испарителя ОАО «Химпром» зона аэрации по строению, составу и свойствам грунтов аналогична объектам ОАО «Каустик» и характеризуется осредненными фильтрационными параметрами (табл. 1).

Вопросы методики фильтрационных расчетов детально освещены в специальной литературе.

Таблица 1 Гидрогеологические параметры объекта

Водно-физически	ие свойства г	рунтов
Естественная влажность	$w_0$	0,26
Пористость	n	0,33
Полная влагоемкость	$w_1$	0,44
Недостаток водонасыщения	μ	0,05
Коэффициент фильтрации	$K_{\Phi}$	0,001 м/сут
Высота капиллярного поднятия	$h_k$	5 м
Капиллярное давление менисков	$H_k$	0,75 м
Глубина грунтовых вод	$h_0$	15 м
Параметры	ы испарителя	
Глубина воды	Н	0,2 м
Длина	l	4762 м
Ширина	В	4762 м

Поскольку пруд-накопитель действует достаточно продолжительное время, расчет проводится для условий установившегося движения при свободной фильтрации в «бесконечной» по мощности зоне аэрации. Фильтрационный расход  $Q_{\rm cB}$  из пруда-накопителя определяется по формуле Н. Н. Павловского [1]:

$$Q_{_{\text{CR}}} = lK_{_{\Phi}}(B + 2h_{_{0}}) = 4762 \cdot 0,001(4762 + 2 \cdot 15) = 22820 \text{ m}^{3}/\text{cyr}.$$
 (1)

Следует заметить, однако, что суглинистый состав зоны аэрации предполагает капиллярное движение влаги. Водопроницаемость капиллярной зоны значительно меньше проводимости зоны полного водонасыщения, а соотношение фильтрационного расхода  $Q_{\phi}$  при свободной фильтрации и капиллярном движении определяется из зависимости [2]:

$$Q_{\rm b} = \alpha Q_{\rm cb},\tag{2}$$

где коэффициент  $\alpha$  зависит от отношения  $Y/h_{\kappa}$  (Y — высота от уровня грунтовых вод (15 м),  $h_{\kappa}$  — высота капиллярного поднятия (5 м)). При  $Y/h_{\kappa} \ge 1$  (в данном случае это условие сохраняется) выражение для  $\alpha$  принимает следующий вид [2]:

$$\alpha = \frac{4}{11} \frac{1 + 0.22 w_0 / w_1}{1 + w_0 / w_1} = \frac{4}{11} \frac{1 + 0.22 \cdot 0.59}{1 + 0.59} = 0.26.$$
 (3)

Таким образом, величина установившегося фильтрационного расхода из пруда-накопителя ОАО «Химпром» составит по формуле (2):

$$Q_{\Phi} = 0.26 \cdot 22820 = 5933 \text{ m}^3/\text{cyt}.$$

На площади водного зеркала 22,68  ${\rm km}^2$  слой фильтрационного стока составит, таким образом:

$$5933: 22680000 = 0,00026 \text{ м/сут} = 0,095 \text{ м/год}.$$

При мощности зоны аэрации  $h_0 = 15$  м это означает, что в условиях однородности строения и ненарушенности водоупорного слоя хвалынских глин поток фильтрации не достигнет поверхности подземных вод, в связи с чем можно утверждать отсутствие влияния пруда-испарителя на хазарский водоносный горизонт.

Таким образом, воздействие стоков из пруда-испарителя на хазарский водоносный горизонт, учитывая крайне незначительную величину фильтрационного расхода сточных вод, практически отсутствует.

Следует отметить, что в районе пруда-испарителя ОАО «Химпром» отсутствуют водозаборные скважины, эксплуатирующие хазарский водоносный горизонт. Ближайшая водозаборная скважина № 102 служит для хозяйственно-питьевого водоснабжения пос. Дубовый Овраг из хазарского водоносного горизонта и расположена на расстоянии свыше 10 км от пруда.

Для характеристики гидрогеохимических условий и достоверной оценки возможности загрязнения подземных вод хазарского водоносного горизонта в результате фильтрационных процессов из пруда-испарителя было проведено изучение динамики уровня и химического состава подземных вод.

Максимальные уровни, отражающие величину напора хазарского водоносного горизонта, отмечаются в июне и гидравлически связаны с паводком в Волге. Однако гидравлическая связь на столь большом расстоянии проявляется довольно слабо: амплитуды колебания уровней по скважинам составляют 0,1...0,3 м. Температура подземных вод относительно стабильна.

Результаты аналитического контроля химического состава подземных вод приведены в табл. 2.

Сравнивая концентрацию основных ингредиентов в составе подземных вод с ПДК, следует отметить, что по некоторым показателям (ХПК, железу и марганцу, нефтепродуктам) концентрация химических веществ в воде скважин незначительно превышает нормативные значения, при этом содержание железа и марганца весьма заметно в скв. 206, наиболее близкой к прудучиспарителю.

Таблица 2 Результаты химического анализа подземных вод хазарского водоносного горизонта по наблюдательным скважинам

	Наименование по-				СКІ	ВАЖИ	HA №			
$N_{\underline{0}}$	казателя	105x	108x	24	25	26	207	206	ПДК	При-
$\Pi/\Pi$	ДАТА отбора	05.07	05.07	03.07	03.07	03.07	03.07	03.07	11ДК ВОДЫ	меча-
	дата отоора	05.07	05.07						воды	ние
						онцент				
	САНИТА									
1	рН	10,05	8,40	8,60	6,36	7,86	8,26	7,07	6,58,5	
2	Сухой остаток	1534,0						2763,0	20.0	
3	ХПК	54,2	52,1	45,8	93,8	129,2	48,0	110,4	30,0	
4	БПК-5 Азот аммонийный	2,24	2,19	3,95	4,1	3,72	1,90	3,48	6,0	
5	(N)	1,46	11,55	13,2	3,4	3,3	5,0	2,8	2,0	
6	Азот нитритов $(NO_2)$	0,34	0,14	1,7	0,03	0,10	0,10	н/о	3,3	
7	Азот нитратов $(NO_3)$	н/о	н/о	0,81	н/о	0,68	0,72	н/о	45,0	
8	Сульфаты	72,2	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	180,0	
9	Фосфаты РО <sub>4</sub>	1,7	4,3	0,24	н/о	0,25	н/о	н/о	3,5	
	Хлориды	505,4	70,2	526,5	1368,9	1719,9	554,6	1263,7	816,2	
11	Железо общее вал.	19,1	34,9	11,8	13,1	7,5	4,7	15,5	0,3	
12	Железо 2-вал. ва- ловое	11,2	22,6	10,3	9,3	7,4	4,1	8,4	_	
13	Железо 3-вал. ва- ловое	н/о	0,14	н/о	н/о	0,76	0,06	н/о		
14	Железо общее раств.	0,88	0,90	0,54	4,1	0,25	0,27	3,5		
15	Железо 2-вал. раст.	0,80	0,90	0,16	4,1	0,25	0,27	3,5		
16	Железо 3-вал. раст.	н/о	н/о	0,16	н/о	н/о	н/о	н/о		
17	Кальций	7,4	20,8	8,6	148,0	64,1	38,1	188,0	_	
18	Магний	3,3	8,3	22,4	83,9	161,0	47,4	153,2	_	
19	Жесткость кал маг, мгэкв/дм <sup>3</sup>	0,64	1,7	2,3	14,3	16,4	5,8	22,2	10,4	
20	Гидрокарбонаты	818,9	436,3	245,0	13,4	328,9	332,3	30,2		
21	Общая карбонатная жесткость, мгэкв/дм <sup>3</sup>	17,4	7,2	4,0	0,22	5,4	5,4	0,49	_	
22	Сумма катионов	416,1	299,7	82,1	827.1	1092,8	184.2	720,1	_	
	Сумма анионов					2049,8			_	
	1 - 5			<u>ТИНГР</u>	•		,-	,2		
24	Нефтепродукты	0,49	1,23	0,83	0,34	0,50	0,29	0,07	0,3	
	Натрий	384,8	223,8	23,9	576,4	856,9	87,4	358,9	200,0	
	Калий	н/о	н/о	1,9	н/о	н/о	1,5	0,99	_	
27	Ртуть	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	0,0005	
28	Кадмий	0,0017	0,0041	0,0021	0,0026	0,0019	0,0019	0,0019	0,001	
29	Марганец	н/о	0,32	0,27	2,3	н/о	0,12	0,67	0,1	
	Фенолы	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	0,001	
31	Фториды	0,57	0,48	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	0,7	

Окончание табл. 2

-	Наименование показа-	СКВАЖИНА №								
<b>№</b> п/п	теля	105x	108x	24	25	26	207		ПДК	Примеча-
	ДАТА отбора	05.07	05.07	03.07	03.07	03.07	03.07		воды	ние
ХЛОРОРГАНИКА										
32	Хлористый метил	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	_	
33	Хлористый винил	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	0,05	
34	Метиленхлорид	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	7,5	
35	Винилиденхлорид	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	—	
36	Углерод четыреххлори- стый	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	0,006	_
37	Хлороформ	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	0,06	
38	1,2-Дихлорэтан	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	0,02	
39	Трихлорэтилен	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	0,006	
40	1,1,2-Трихлорэтан	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	10,0	
АРОМАТИКА										
41	Толуол	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	0,5	_
42	Ксилол	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	0,05	_
43	Бензол	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	_	_

Следует учесть, что многие показатели в подземных водах хазарского водоносного горизонта имели фоновые значения (до начала строительства прудов) выше, чем в настоящее время в очищенных стоках. Анализ данных изысканий показывает, что в Прикаспийской низменности в составе природных вод четвертичных морских и озерно-аллювиальных отложений с пестрой минерализацией фактическое содержание элементов может достигать, мг/л: фтора — до 1,5; марганца — от 0,4 до 7,0...8,0; аммония — до 12,5; бора, стронция и кадмия — до 0,5...5,0.

В результате выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

- 1. Гидрогеологические условия территории характеризуются наличием ряда водоносных горизонтов, из которых основным, используемым для водоснабжения, является хазарский горизонт. При этом населенные пункты и водозаборные сооружения находятся на значительном удалении от прудачиспарителя, исключающем возможность его влияния на качество подземных вод в районе водозаборов.
- 2. Проведенные гидродинамические расчеты показали, что в условиях однородности строения и ненарушенности водоупорного слоя хвалынских глин поток фильтрации в обозримом будущем не достигнет зеркала подземных вод и не отразится на качестве подземных вод, используемых в населенных пунктах для питьевого водоснабжения.
- 3. Анализ многолетних аналитических исследований химического состава подземных вод в различные годы по наблюдательным скважинам в районе пруда-испарителя показал, что в целом концентрация химических веществ в воде скважин остается относительно стабильной. Тем не менее, наличие в отдельные годы в подземных водах таких ингредиентов, как ртуть и фенолы, свидетельствует о потенциальной возможности влияния на хазарский водоносный горизонт предприятий Южного промузла.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1.  $\Pi$ авловский H. H. Основы гидромеханического решения задач о свободной фильтрации из открытых русел // Известия ВНИИГ. 1936. Т. 19.
- 2. Аверьянов С. Ф. Приближенная оценка фильтрации в зоне «капиллярной каймы» // Доклады академии наук СССР. 1949. Т. 69. Вып. 3.
- 1. *Pavlovskiy N. N.* Osnovy gidromekhanicheskogo resheniya zadach o svobodnoy fil'tratsii iz otkrytykh rusel // Izvestiya VNIIG. 1936. T. 19.
- 2. *Aver'yanov S. F.* Priblizhennaya otsenka fil'tratsii v zone «kapillyarnoy kaymy» // Doklady akademii nauk SSSR. 1949. T. 69. Vyp. 3.

© Шубин М. А., 2014

Поступила в редакцию в феврале 2014 г.

### Ссылка для цитирования:

Шубин М. А. Анализ и оценка влияния пруда-накопителя ОАО «Химпром» на качество подземных вод, используемых для водоснабжения населения // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стрво и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 211—217.

# ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

УДК 62-82:621.86

#### Н. А. Фоменко, В. И. Богданов, Н. В. Сапожкова

### ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ГИДРОПРИВОДА ТЯГОВО-ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Проанализированы тенденции развития способов защиты гидропривода транспортных средств от несанкционированного выброса рабочей жидкости при разрушении рукавов высокого давления.

K л ю ч е в ы е с л о в а: трубопровод, гидропривод, гидросистема, рукав высокого давления, защита гидропривода.

Tendencies of development of ways of protection of a hydraulic actuator of vehicles from unauthorized emission of working liquid at destruction of sleeves of a high pressure are analyzed.

K e y w o r d s: pipeline, hydraulic actuator, hydraulic system, sleeve of a high pressure, protection of a hydraulic actuator

Анализ отечественных и зарубежных источников показывает, что на практике определилась область применения гидропривода — в подъемнотранспортных механизмах, системах регулирования глубины дорожного покрытия при планировке, механизмах включения отбора мощности и ведущих мостов транспортных средств, привода тормозов, управления трансмиссией, регулирования колес, отбора мощности для привода активных рабочих органов, привода ходовой системы мобильных тягово-транспортных средств и др.

Наиболее широко объемный гидропривод используется в тяговотранспортных средствах, грузоподъемных машинах и манипуляторах. Гидропривод обеспечивает не только подъем и опускание орудий, грузов, но и автоматическое регулирование заданного режима работы машины.

В конструкциях тягово-транспортных средств широко представлены три принципиальные схемы гидроприводов: системы с постоянным расходом (СПР), с постоянным давлением (СПД) и чувствительные к нагрузке (СЧН).

Для СПР характерно использование в качестве источников питания насосов постоянного рабочего объема (шестеренных), для СПД — насосов с постоянным или переменным объемом. Недостатком первой схемы являются потери мощности потребителей различной гидравлической загрузки, второй — повышение требований к герметичности распределительной аппаратуры, поэтому наиболее рациональной считается комбинированная система СЧН, обеспечивающая автоматическое изменение давления и расхода. Давление в таких системах преимущественно составляет 16...20 МПа.

Дальнейшее увеличение мощности гидропривода за счет повышения рабочего давления нередко приводит к разрушению рукавов высокого давления и несанкционированному выбросу рабочей жидкости в атмосферу (46...335 л за один выброс). Выброс в атмосферу такого количества рабочей жидкости (минерального масла — нефтепродукта) наносит колоссальный ущерб экологической безопасности, фауне и флоре, приводит к невосполнимым материальным потерям биоресурсов.

По этой причине рост рабочего давления в гидросистемах тяговотранспортных средств, мобильных грузоподъемных машин, манипуляторов ограничен рабочим давлением третьего исполнения (18...20 МПа), что не позволяет поднять энергоемкость гидропривода и, соответственно, улучшить эксплуатационные и технико-экономические показатели гидропривода. Поэтому совершенствование конструкции систем защиты гидроприводов и их элементов, например гибких рукавов высокого давления гидравлических систем тягово-транспортных средств, является весьма актуальной задачей.

Применение органических (растительного происхождения) рабочих жидкостей, безвредных при несанкционированном выбросе их в атмосферу, не может обеспечить работу многочисленного парка тягово-транспортных средств из-за длительного цикла производства и высокой себестоимости этих жидкостей. В этой связи целесообразно продолжать исследования по совершенствованию способов и устройств защиты гидропривода и его элементов.

В настоящее время борьба с потерями рабочей жидкости при несанкционированном выбросе в атмосферу ведется по двум направлениям: повышение прочности рукавов и создание способов и систем защиты.

Создано множество типов систем защиты гидропривода, которые отличаются по принципу действия, месту расположения, функциональным параметрам, типу сигнального устройства, методу устранения потерь рабочей жидкости.

По принципу действия можно выделить несколько типов: поплавковые, пневмоэлектрические, гидропневматические, гидромеханические. У большинства защитных устройств потери после срабатывания составляют от 3 до 10 л, например у пневмоэлектрической системы защиты — 6...8 л, у поплавковой системы защиты — до 10 л.

Для гидропневматической системы защиты собственной (авторской) разработки [1] потери рабочей жидкости после срабатывания защитного устройства составили 0,5...1,2 л, а для гидромеханической [2, 3] — 0,17 л. Несмотря на высокую чувствительность защитных устройств и низкий уровень выброса жидкости при их срабатывании, проблема повышения энергоемкости гидропривода сохраняется даже при ограниченной потенциальной возможности существующих гибких рукавов высокого давления.

Существует широкая номенклатура металлических трубопроводов диаметром от 4 до 42 мм и толщиной стенок от 1,5 до 4 мм с 4...8-кратным запасом прочности, обеспечивающим герметичность при номинальном давлении от 10 до 63 МПа. Повышение прочности металлических трубопроводов приводит к увеличению материалоемкости. Применение таких трубопроводов в приводах рабочих органов, имеющих несколько степеней свободы, усложняет конструкцию шарнирных сочленений и не гарантирует герметичность.

Надежность гидросистемы современных тягово-транспортных средств во многом определяется совершенством конструкции гибких рукавов высокого давления. Для повышения их прочности применяют оплеточное или навивочное металлическое армирование. Установлено, что в условиях циклических нагрузок оплеточная арматура по прочности уступает навивочной. Однако как оплеточные, так и навивочные рукава не выдерживают длительных циклических нагрузок при номинальном давлении в гидросистеме за границей третьего исполнения (18...20 МПа).

Нами предлагаются следующие пути совершенствования гидроприводов: поиск новых технических решений по созданию или модернизации защитных устройств, защита рукава оболочки для сбора и транспортировки на слив (гидробак) рабочей жидкости при разрушении рукава, создание рукава со свойствами, снижающими циклические нагрузки на рукав и, как следствие, обеспечивающими повышенный ресурс.

Получено положительное решение ФИПС от 12.11.2013 г. на изобретение (патент) — трубопровод высокого давления (рис. 1).

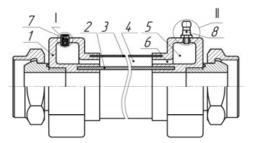


Рис. 1. Трубопровод высокого давления

Трубопровод высокого давления состоит из двух наконечников I с присоединенными гайками, силового рукава 2, прочной оболочки 3, надетой на рукав 2, обжатых наконечниками и образующих герметичную полость 4. В теле наконечников имеются камеры 5, сообщающиеся кольцевыми каналами 6 с полостью 4. На одном из наконечников имеется нагнетательный с обратным клапаном ниппель 8, а на другом — сливной с редукционным клапаном ниппель 7.

Трубопровод высокого давления работает следующим образом. При изготовлении трубопровода полость между силовым рукавом и оболочкой заполняется газом (воздухом) под давлением через, например, нагнетательный с обратным клапаном ниппель (рис. 2,  $\delta$ ) или сливной с редукционным клапаном (рис. 2, a), который дополнительно герметизируется полимерной композицией 13.

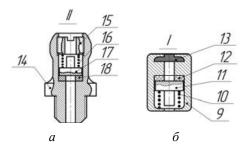


Рис. 2. Виды клапонов: a — сливной с редукцинным клапаном;  $\delta$  — нагнетательный с обратным клапаном ниппеля

При подаче рабочей жидкости по рукаву стенка рукава (рис. 3) будет находиться под внутренним давлением P1 рабочей жидкости в рукаве. По граням выделенного в стенке рукава элемента A с радиальной координатой р возникают, как известно, нормальные напряжения  $\sigma$  в радиальном и окружном направлениях. Превышение этих напряжений сверх допустимых приводит к разрыву рукава трубопровода вдоль продольной оси, так как окружные напряжения существенно больше радиальных.

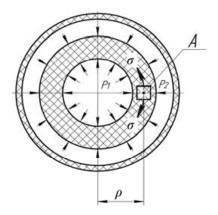


Рис. 3. Схема напряжений в стенках трубопровода

Внешнее давление газа P2 в полости на наружную поверхность рукава снижает напряжения  $\sigma$  в стенке рукава, а газовая оболочка из-за сжимаемости газа сглаживает пульсацию нормальных напряжений, возникающую при переключениях гидропотоков и пульсирующей подаче рабочей жидкости от гидрообъемных насосных агрегатов, что способствует повышению эксплуатационной надежности и долговечности работы рукава трубопровода. При этом эффект сглаживания пульсаций напряжений возрастает за счет увеличения объема полости 4 (см. рис. 1) камерами 5 и кольцевыми каналами 6 в металлических наконечниках трубопровода.

Гофрированная поверхность оболочки 3 (рис. 4) позволяет трубопроводу эффективно изгибаться без опасения излома его стенки.

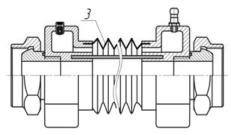


Рис. 4. Трубопровод высокого давления с гофрированной оболочкой

При разрыве силового рукава 2 рабочая жидкость попадает в полость оболочки 4, и при достижении в камере 5 давления, не вызывающего разрыв стенки оболочки, редукционный клапан 17 (см. рис. 2,  $\delta$ ), преодолевая усилие пружины 16, открывается, и рабочая жидкость далее через отверстие в пробке 15 может поступать через сливную магистраль в гидробак, что позволяет изолировать выброс рабочей жидкости в атмосферу.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Фоменко Н. А., Перельмитер В. И., Фоменко В. Н. Система защиты гидропривода: пат. RU 15763 U1 7 F 15 B 21/00.
- 2. Фоменко Н. А., Дубинский С. В., Голобута Г. И., Лышко Г. П. Система защиты гидропривода: патент SU 1813937 A1 F 15 B 20/00.
- 3. Фоменко В. Н., Перельмитер В. И., Фоменко Н. А., Шевчук В. П. Гидравлическая система: пат. RU 15764 U1 7 F 15 B 21/00.
- 1. Fomenko N. A., Perel'miter V. I., Fomenko V. N. Sistema zashchity gidroprivoda: pat. RU 15763 U1 7 F 15 B 21/00.
- 2. Fomenko N. A., Dubinskiy S. V., Golobuta G. I., Lyshko G. P. Sistema zashchity gidroprivoda: patent SU 1813937 A1 F 15 B 20/00.
- 3. Fomenko V. N., Perel'miter V. I., Fomenko N. A., Shevchuk V. P. Gidravlicheskaya sistema: pat. RU 15764 U1 7 F 15 B 21/00. © Фоменко Н. А., Богданов В. И., Сапожкова Н. В., 2014

# Поступила в редакцию в ферале 2014 г.

### Ссылка для цитирования:

Фоменко Н. А., Богданов В. И., Сапожкова Н. В. Пути совершенствования гидропривода тяговотранспортных средств // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 218—222.

# БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ И ОХРАНА ТРУДА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

УДК 614.8:66

### Ф. Г. Габибов, К. А. Багиров

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ АНАЛИЗА РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ХИМИЧЕСКИХ, НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ И НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Приводится анализ понятия «риск». В качестве меры риска возникновения чрезвычайной ситуации (ЧС) на химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятиях авторы предлагают использовать показатель, одновременно учитывающий вероятность возникновения ЧС и величину причиняемого ЧС ущерба. Предлагается формула для определения среднего риска возникновения ЧС, в которой учитывается закон распределения вероятностей негативных факторов на сложную техническую систему и законы распределения ущербов от ЧС при каждом из таких негативных воздействий на техническую систему, используемую на химическом (нефтехимическом, нефтеперерабатывающем) предприятии.

K л ю ч е в ы е с л о в а: риск, анализ, чрезвычайная ситуация, химическое предприятие, ущерб, величина, техническая система, вероятность, мера, фактор.

The analysis of the concept of "risk" is provided. As a measure of risk of emergency at chemical, oil and chemical and oil-refining enterprises the authors suggest using the index which takes into account both the probability of emergency and the value of the damage caused by emergency. They offer formula to find the average risk of emergency, that takes into account the rule of distribution of probabilities of negative factors influencing complex technical system and the rules of distribution of damages caused by emergency under the influence of such negative effects on technical system used at chemical (oil and chemical, oil-refining) enterprises.

K e y w o r d s: risk, analysis, emergency, chemical enterprise, damage, value, technical system, probability, measure, factor.

Существующая база понятия «риск» обширна и разнообразна. Филологи предполагают наличие здесь латинских корней (risicum), что первоначально относилось к испытаниям, которым подвергаются моряки, преодолевая рифы. Французское происхождение (risque) определяется как возможность наступления событий с отрицательными последствиями в результате определенных решений или действий. В переводе со староитальянского risicare означает «отважиться». Арабские корни (risq) предполагают что-либо случайное, данное аллахом. В то же время английское «риск» имеет четкую интерпретацию, например run the risk of или at risk, что означает «подвергаться опасности».

По мнению В. А. Владимирова и других [1], риск есть мера опасности ситуаций, в которых имеются потенциальные факторы, способные неблагоприятно воздействовать на человека, общество и природу.

В. А. Акимов, В. Л. Лапин, В. М. Попов и др. [2] отмечают, что под риском следует понимать ожидаемую частоту или вероятность возникновения опасностей определенного класса, или же размер возможного ущерба от нежелательного события, или же некоторую комбинацию этих величин. Риск является неизбежным, сопутствующим фактором промышленной деятельности. Риск объективен, для него характерны неожиданность, внезапность наступления, что предполагает прогноз риска, его анализ, оценку и управление.

Анализу и оценке техногенных рисков посвящены исследования В. Т. Алымова и Н. П. Тарасовой [3], В. А. Акимова, Н. Н. Радаева [4, 5], В. И. Измалкова и А. В. Измалкова [6, 7], В. С. Сафонова, Г. Э. Одишарии, А. А. Швыряева [8], Ю. Л. Воробьева [9], Б. В. Потапова и Н. Н. Радаева [10], А. Н. Елохина [11], Н. Н. Чуры [12] и др.

Н. Н. Чура [12] считает, что все виды рисков, имеющие техническое происхождение, то есть порожденные техническими объектами, следует отнести к техногенным.

Источники опасностей для технических объектов, то есть источники технического риска, могут быть как внешними по отношению к этим объектам, так и внутренними. К внешним источникам технического риска относятся природные, техногенные и социальные явления и события. Понятие «внутренние источники» относятся к области надежности объектов и технических систем, а также надежности персонала [12].

Анализ риска (риск-анализ) является частью системного подхода к принятию решений, процедур и практических мер по решению задач управления процессом обеспечения безопасности. Основой анализа риска является физическое и математическое моделирование самой технической системы и ее рабочих процессов, включающее взаимодействие основных компонентов системы, операторов, персонала с окружающей средой в штатных и нештатных ситуациях. При анализе рисков формируются и описываются сценарии возникновения и развития аварий и катастроф с применением основных определяющих уравнений и критериев механики, физики, химии и других наук. Оценка риска является составной частью анализа риска.

Моделирование как средство описания и исследования является широко признанным методом анализа и синтеза, оптимизации и проектирования сложных динамических систем, содержащих слабо формализуемые элементы [13].

- Н. А. Махутов и Д. О. Резников [14] отмечают, что обеспечение защищенности сложных технических систем по критерию рисков имеет ряд преимуществ по сравнению с нормативным и вероятностным подходами, поскольку оно позволяет:
- 1) при оценке защищенности системы в явной форме учитывать критичность отказов;
- 2) оценивать защищенность на системном уровне, учитывая способность сложных технических систем функционировать при наличии локальных повреждений;
- учитывать множественность механизмов достижения предельных состояний:
- 4) в более строгой форме учитывать влияние человеческого фактора на надежность технических систем с помощью гибридных многоуровневых моделей:

5) оптимизировать в процессе обеспечения защищенности суммарные затраты жизненного цикла сложной технической системы с учетом стоимости затрат на обеспечение защищенности и рисков аварий.

По мнению М. Е. Ильиной, С. Аль Равашдеха и Т. А. Трифоновой [15], для выбора адекватных мер предупреждения аварий требуется проведение количественной оценки риска их проявления. Оценка риска аварии необходима постоянно, так как она зависит не только от проектных параметров, но и от текущей ситуации, а, главное, от сочетания управленческих действий, параметров осуществления процесса, состояния оборудования и персонала, внешних условий. Предупреждение аварии возможно при постоянном контроле за процессом и прогнозировании риска. Необходим постоянный анализ аварийных случаев, их причин и следствий, хода аварийно-спасательных работ.

Исследования Н. А. Махутова, Д. О. Резникова, В. П. Петрова и В. И. Куксова [16] показали, что использование матриц риска при проведении оценки риска и для преоритезации защитных мероприятий позволяет получить целостную систему оценки, документирования дифференциальных рисков, сформировать предварительные рекомендации по определению приоритетности мер, направленных на парирование различных рисков. Но следует отметить, что теоретическое обоснование корректности использования матриц риска как инструмента ранжирования рисков не достаточно проработано и нуждается в дальнейшем обосновании. Матрицы риска позволяют оценивать дифференциальные риски, связанные с отдельными неблагоприятными событиями, но не дают возможность оценивать общий уровень защищенности объекта с учетом множественности угроз, которым он подвергается.

В качестве меры риска возникновения чрезвычайной ситуации (аварии, катастрофы) на химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятиях целесообразно использовать показатель, одновременно учитывающий две характеристики: 1) вероятность возникновения чрезвычайной ситуации; 2) величину причиняемого чрезвычайной ситуацией (аварией, катастрофой) ущерба [17]. Исходя из вышеизложенного, мерой риска возникновения чрезвычайной ситуации (ЧС) на химическом, нефтехимическом и нефтеперерабатывающем предприятии является показатель среднего риска ЧС:

$$R = \sum_{i=1}^{n} P_i X_i, \tag{1}$$

где  $P_i$  — вероятность получения ущерба от ЧС в результате одного из возможных воздействий на сложную техническую систему, используемую на химическом (нефтехимическом или нефтеперерабатывающем) предприятии;  $X_i$  — величина ущерба от ЧС, выраженная в стоимостном выражении; R — количественная мера риска возникновения ЧС на химическом (нефтехимическом или нефтеперерабатывающем) предприятии, т. е. средний риск, выражаемый в тех же показателях, что и ущерб; n — число возможных вариантов ущербов, которые могут быть при различных вариантах ЧС на химическом (нефтехимическом или нефтеперерабатывающем) предприятии.

Таким образом, для определения величины риска ЧС на химическом (нефтехимическом или нефтеперерабатывающем) предприятии согласно (1) необходимо иметь информацию, выражающую соответствие значений

 $P_i$  и  $X_i$ ,  $i=1,\,2,\,...,\,n$ . Такая информация в простейшем случае определяет закон распределения вероятностей в пространстве ущербов от ЧС на химическом (нефтехимическом или нефтеперерабатывающем) предприятии.

Предполагая непрерывную зависимость вероятности  $P_i$  от значений ущерба от ЧС x, получим:

$$P_i = P(x), \tag{2}$$

а выражение (1) может быть представлено в интегральном виде:

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} x P(x) dx.$$
 (3)

В общем случае, когда ущерб от ЧС на химическом (нефтехимическом или нефтеперерабатывающем) предприятии может наступать вследствие различных неблагоприятных и не зависящих друг от друга событий, средний риск возникновения ЧС может быть определен по следующей формуле:

$$R = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} P_{ij} X_{i}, \tag{4}$$

где  $P_{ij}$  — вероятность получения ущерба от ЧС на химическом (нефтехимическом или нефтеперерабатывающем) предприятии  $X_i$  при наступлении события (внутреннего или внешнего воздействия) j-го типа.

Вероятность получения ущерба от ЧС на химическом (нефтехимическом или нефтеперерабатывающем) предприятии из формулы (4) определяется как условная вероятность согласно следующему произведению:

$$P_{ij} = P_j P_i \left( j \right), \tag{5}$$

где  $P_j$  — вероятность наступления неблагоприятного события j-го типа (негативного воздействия на сложную техническую систему), способствующего возникновению и развитию ЧС на химическом (нефтехимическом или нефтеперерабатывающем) предприятии;  $P_i(j)$  — вероятность получения ущерба  $X_i$  при негативном воздействии на сложную техническую систему, используемую на химическом (нефтехимическом или нефтеперерабатывающем) предприятии j-го типа.

При условии, что ущербы от различных воздействий на сложную техническую систему, используемую на химическом (нефтехимическом или нефтеперерабатывающем) предприятии, измеряются по одной шкале (например, в стоимостном выражении) и с учетом формулы (5) для определения величины среднего риска возникновения ЧС вместо выражения (4) можно использовать следующую формулу:

$$R = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} P_{j} P_{i}(j) X_{i}.$$
 (6)

В формуле (6)  $P_i$  выражает закон распределения вероятностей негативных факторов на сложную техническую систему, а  $P_i(j)$  — законы распределения ущербов от ЧС при каждом из таких негативных воздействий на сложную техническую систему, используемую на химическом (нефтехимическом, нефтеперерабатывающем) предприятии.

Формулы (1)—(6) определяют величину среднего риска ЧС на химическом (нефтехимическом или нефтеперерабатывающем) предприятии, подвергшемся техногенной опасности.

Лицо или группа лиц, управляющих процессами проектирования, сооружения (монтажа), испытания и эксплуатации сложной технической системы, используемой в химическом (нефтехимическом или нефтеперерабатывающем) предприятии, могут совершать два вида деятельности:

1. Принимать меры с целью предотвращения или уменьшения потерь от неблагоприятного события (имеются в виду различные инженерные мероприятия по усилению различных узлов и конструкций и защите технической системы). При этом управленец (или управленцы) не влияют на возможность проявления неблагоприятного события. Риски таких событий получили название «чистые риски». Указанные меры связываются с определенными затратами. В таком случае в формуле среднего риска ЧС от негативного воздействия на сложную техническую систему необходимо увязать вероятность ущерба от ЧС  $P_i(j)$  с произведенными затратами на его предотвращение (уменьшение). В этом случае выражение (6) примет следующий вид:

$$R = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} P_{j} P_{i} \left( j, z_{j} \right) X_{i},$$
 (7)

где  $P_i\Big(j,\!z_j\Big)$  — вероятность возникновения ущерба от ЧС  $X_i$  при негативном воздействии на сложную техническую систему j-го типа и выполненных усилительных и защитных инженерных мероприятиях от указанного негативного воздействия с затратами  $z_j$ .

Различия в формулах (6) и (7) можно проиллюстрировать графиком (рис. 1).

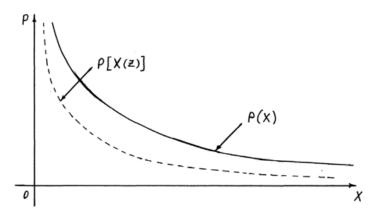


Рис. 1. Сопоставление подходов в определении параметров риска проявления ЧС при осуществлении и неосуществлении усилительных и защитных инженерных мероприятий

- P(x) означает распределение потерь при ЧС на химическом (нефтехимическом или нефтеперерабатывающем) предприятии при отсутствии усилительных и защитных инженерных мероприятий.  $\Delta X = X X(z)$  снижение величины ущерба от ЧС (аварии, катастрофы) на химическом (нефтехимическом или нефтеперерабатывающем) предприятии в результате осуществления усилительных и защитных мероприятий.
- 2. Занимать авантюристскую позицию по отношению к сложной технической системе, используемой на химическом (нефтехимическом или нефтеперерабатывающем) предприятии. То есть сознательно выбирать ситуацию, характеризующую другую вероятность проявления ЧС. Может быть выбрана более рискованная ситуация с большей вероятностью ущерба из расчета получить дополнительные преимущества (при этом частично или полностью игнорируются нормативные документы по проектированию, сооружению (монтажу), испытанию и эксплуатации сложных технических систем, используемых на химических (нефтехимических или нефтеперерабатывающих) предприятиях). В большинстве случаев руководители (управленцы) в такой ситуации полагаются на авось.

Часто руководители сознательно стараются компенсировать авантюрность страхованием своих вложений. Подобного рода риски можно назвать авантюрно-спекулятивными. С учетом возможности такого выбора величину среднего риска проявления ЧС на химическом (нефтехимическом или нефтеперерабатывающем) предприятии можно определить на основании следующего выражения:

$$R = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} g_{ij}(V) P_{j} P_{i}(j) X_{i},$$
(8)

где  $g_{i\,j}(V)$  — вероятность выбора руководством (управленцами) ситуации, характеризующейся вероятностью проявления ЧС в сложной технической системе  $P_i$  при негативном воздействии j-го типа.

Особенность подхода к определению риска проявления ЧС на химическом (нефтехимическом или нефтеперерабатывающем) предприятии на основе выражения (8) может быть проиллюстрирована графиком, представленным на рис. 2.

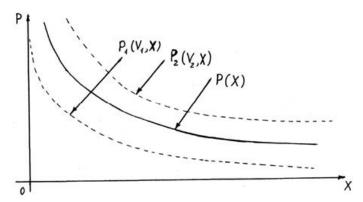


Рис. 2. Сопоставление параметров риска при возможности и невозможности выбора руководством предприятия ситуации

P(X) означает закон распределения ущерба при отсутствии выбора ситуации,  $P_1(V_1,X)$  — закон распределения ущерба при менее рискованной ситуации,  $P_2(V_2,X)$  — закон распределения ущерба при более рискованной ситуации,  $P_0(X_i)$ ,  $P_1(X_i)$ ,  $P_2(X_i)$  — вероятность появления ущерба  $X_i$  в каждой из рассматриваемых ситуаций,  $V_1$  и  $V_2$  — набор факторов, определяющих целесообразность перехода руководством предприятия от ситуации 0 к ситуациям 1 и 2.

Из сравнения рис. 1 и 2 вытекает, что принципиальных различий между видами деятельности руководства предприятия по снижению величины среднего риска не наблюдается, хотя в одном случае это снижение обеспечивается за счет уменьшения ущерба от проявления неблагоприятного события, а в другом за счет уменьшения вероятности проявления неблагоприятного события по причине выбора менее рискованной ситуации. Однако и в том, и другом случае снижение риска обеспечивается за счет перехода к ситуации с другим законом распределения вероятностей ущерба. Вследствие этого выражение (8) может рассматриваться в качестве общей формулы для оценки величины среднего риска, учитывающей все возможные определяющие его факторы и усилия.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Владимиров В. А., Воробьев Ю. Л., Салов С. С. Управление риском: Риск. Устойчивое развитие. Синергетика. М.: Наука, 2000. 431 с.
- 2. Надежность технических систем и техногенный риск / В. А. Акимов, В. Л. Лапин, В. М. Попов, В. А. Пучков, В. И. Томаков, М. И. Фалеев. М.: Деловой экспресс, 2002. 368 с.
- 3. Алымов В. Т., Тарасова Н. П. Техногенный риск: анализ и оценка. М. : Академкнига, 2007. 118 с.
- 4. Акимов В. А., Новиков В. Д., Радаев Н. Н. Природные и техногенные чрезвычайные ситуации: опасности, угрозы, риски. М.: Деловой экспресс, 2001. 344 с.
- 5. Акимов В. А., Лесных В. В., Радаев Н. Н. Основы анализа и управление риском в природной и техногенной сферах. М.: Деловой экспресс, 2004. 352 с.
- 6. Измалков В. И., Измалков А. В. Безопасность и риск при техногенных воздействиях. Ч. 1, 2. М. ; СПб., 1994. 269 с.
- 7. Владимиров В. А., Измалков В. И., Измалков А. В. Оценка риска и управление техногенной безопасностью. М.: Деловой экспресс, 2002. 184 с.
- 8. *Сафонов В. С., Одишария Г. Э., Швыряев А. А.* Теория и практика анализа риска в газовой промышленности. М.: НУМЦ Минприроды РФ, 1996. 208 с.
- 9. *Воробьев Ю. Л.* Основы формирования и реализации государственной политики в области снижения рисков чрезвычайных ситуаций. М.: Деловой экспресс, 2000. 248 с.
- 10. Потапов В. В., Радоев Н. Н. Экономика природного и техногенного рисков. М. : Де-
- ловой экспресс, 2001, 513 с. 11.  $\mathit{Елохин}$  А. Н. Анализ и управление риском: Теория и практика. М. : Лукойл, 2000. 185 с.
  - 12. Чура Н. Н. Техногенный риск. М.: КНОРУС, 2011. 280 с.
- 13. Дубров А. М. Моделирование рискованных ситуаций в экономике и бизнесе. М.: Финансы и статистика, 2000. 176 с.
- 14. *Махутов Н. А.*, *Резников Д. О.* Анализ и обеспечение защищенности объектов критических с учетом рисков и предельных состояния // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2012. № 5. С. 14—36.
- 15. *Ильина М. Е., Аль Равашдех С., Трифонова Т. А.* Применение методов прогнозирования ситуации при риск-анализе жизненного цикла производства // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2007. № 4. С. 56—63.
- 16. Использование матриц риска при проведении оценки риска и приоритезации защитных мероприятий / Н. А. Махутов, Д. О. Резников, В. П. Петров, В. И. Куксова // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. № 1. 2012. С. 8—17.

- 17. Габибов Ф. Г., Багиров К. А. Разработка методики определения параметров риска возникновения чрезвычайной ситуации на химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятиях // Экология и водное хозяйство. 2013. № 4. С. 36—41.
- 1. Vladimirov V. A., Vorob'ev Yu. L., Salov S. S. Upravlenie riskom: Risk. Ustoychivoe razvitie. Sinergetika. M.: Nauka, 2000. 431 s.
- 2. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyy risk / V. A. Akimov, V. L. Lapin, V. M. Popov, V. A. Puchkov, V. I. Tomakov, M. I. Faleev. M.: Delovoy ekspress, 2002. 368 s.
  - 3. Alymov V. T., Tarasova N. P. Tekhnogennyy risk: analiz i otsenka. M.: Akademkniga, 2007. 118 s.
- 4. Akimov V. A., Novikov V. D., Radaev N. N. Prirodnye i tekhnogennye chrezvychaynye situatsii: opasnosti, ugrozy, riski. M.: Delovoy ekspress, 2001. 344 s.
- 5. Akimov V. A., Lesnykh V. V., Radaev N. N. Osnovy analiza i upravlenie riskom v prirodnoy i tekhnogennoy sferakh. M.: Delovoy ekspress, 2004. 352 s.
- 6. *Izmalkov V. I., Izmalkov A. V.* Bezopasnost' i risk pri tekhnogennykh vozdeystviyakh. Ch. 1, 2. M.; SPb., 1994. 269 s.
- 7. Vladimirov V. A., Izmalkov V. I., Izmalkov A. V. Otsenka riska i upravlenie tekhnogennoy bezopasnost'yu. M.: Delovoy ekspress, 2002. 184 s.
- 8. Safonov V. S., Odishariya G. E., Shvyryaev A. A. Teoriya i praktika analiza riska v gazovoy promyshlennosti. M.: NUMTs Minprirody RF, 1996. 208 s.
- 9. *Vorob'ev Yu. L.* Osnovy formirovaniya i realizatsii gosudarstvennoy politiki v oblasti snizheniya riskov chrezvychaynykh situatsiy. M.: Delovoy ekspress, 2000. 248 s.
- 10. Potapov B. V., Radaev N. N. Ekonomika prirodnogo i tekhnogennogo riskov. M.: Delovoy ekspress, 2001, 513 s.
  - 11. Elokhin A. N. Analiz i upravlenie riskom: Teoriya i praktika. M.: Lukoyl, 2000. 185 s.
  - 12. Chura N. N. Tekhnogennyy risk. M.: KNORUS, 2011. 280 s.
- 13. *Dubrov A. M.* Modelirovanie riskovannykh situatsiy v ekonomike i biznese. M.: Finansy i statistika, 2000. 176 s.
- 14. *Makhutov N. A.*, *Reznikov D. O.* Analiz i obespechenie zashchishchennosti ob"ektov kriticheskikh s uchetom riskov i predel'nykh sostoyaniya // Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy. 2012. № 5. S. 14—36.
- 15. *Il'ina M. E., Al' Ravashdekh S., Trifonova T. A.* Primenenie metodov prognozirovaniya situatsii pri risk-analize zhiznennogo tsikla proizvodstva // Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy. 2007. № 4. S. 56—63.
- 16. Ispol'zovanie matrits riska pri provedenii otsenki riska i prioritezatsii zashchitnykh meropriyatiy / N. A. Makhutov, D. O. Reznikov, V. P. Petrov, V. I. Kuksova // Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy. № 1. 2012. S. 8—17.
- 17. *Gabibov F. G., Bagirov K. A.* Razrabotka metodiki opredeleniya parametrov riska vozniknoveniya chrezvychaynoy situatsii na khimicheskikh, neftekhimicheskikh i neftepererabatyvayushchikh predpriyatiyakh // Ekologiya i vodnoe khozyaystvo. 2013. № 4. S. 36—41.

© Габибов Ф. Г., Багиров К. А., 2014

Поступила в редакцию в марте 2014 г.

# Ссылка для цитирования:

 $\Gamma$ абибов Ф.  $\Gamma$ ., Багиров К. А. Исследование проблем анализа риска возникновения чрезвычайных ситуаций на химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятиях // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 223—230.

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

УДК 693.5+69.057.5

С. Г. Абрамян, А. М. Ахмедов, В. С. Халилов, Д. А. Уманцев

# РАЗВИТИЕ МОНОЛИТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА И СОВРЕМЕННЫЕ ОПАЛУБОЧНЫЕ СИСТЕМЫ

Рассмотрены основные преимущества монолитного бетона и железобетона, развитие монолитного строительства и нововведения в опалубочных системах. Анализируется необходимость разработки новой классификации и индексации опалубочных систем. Предлагается использовать для малоэтажного строительства несъемные опалубки из монолитного бетона с наружной рельефной структурой для придания архитектурной выразительности и надежности строящимся объектам.

К л ю ч е в ы е с л о в а: монолитное строительство, опалубочные системы, небоскребы, классификация, индексация опалубочных систем, трудозатраты на устройство различных видов опалубок, несъемная опалубка.

The authors consider the basic advantages of monolithic concrete and reinforced concrete, the development of monolithic construction and innovations in formwork systems. They analyze the necessity of the development of a new classification and indexing of formwork systems. In low-rise construction it is advisable to use fixed frames from monolithic concrete with a relief outer structure to give architectural expressiveness and reliability to construction projects.

K e y w o r d s: monolithic construction, formwork systems, skyscrapers, classification, indexing of formwork systems, labour costs for different types of formwork, fixed frames.

Инновационный подход к вопросам монолитного строительства, выбор и обоснование методов технологии и организации работ стали необходимы не только для развития строительной отрасли, качественного обеспечения зданий и сооружений различного функционального назначения, но и стратегического прорыва в совершенствовании новых опалубочных систем, научного подхода к их выбору и обоснованию. Архитектурная выразительность, индивидуальность, повышенное качество, долговечность, надежность зданий и сооружений, наименьшие материальные, трудовые, энергетические затраты на их возведение сделали монолитное строительство самым высокотехнологичным видом строительства во всем мире.

Об этом вполне может свидетельствовать доля монолитного бетона и железобетона в общем объеме бетонных конструкций, производимых в различных странах мира. Однако статистические данные, исследования и даже мировые рейтинги в области монолитного строительства, выполненные соответствующими организациями, настолько противоречивы, что не показывают реальную картину динамики и факторов развития монолитного строительства.

Приведенные на рис. 1 данные, выполненные на основании исследования [1], показывают долю возведения конструктивных частей зданий и сооружений из монолитного бетона и железобетона в указанных двенадцати странах. Оставшаяся часть — производство сборных железобетонных конструкций.

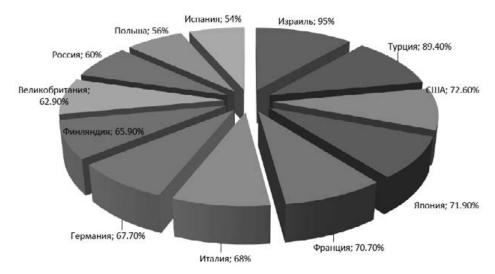


Рис. 1. Доля монолитного бетона и железобетона от общего объема бетонных конструкций, производимых в различных странах, %

Наиболее полное представление об объемах монолитного строительства в вышеуказанных двенадцати странах можно получить, зная душевой показатель применения монолитного бетона и железобетона. На рис. 2 приведены исследованиям десятилетней давности [2]: Израиль, Япония и Италия составляли ведущую тройку по производству монолитного бетона на одного жителя страны.

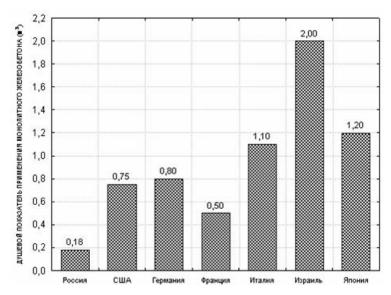


Рис. 2. Душевой показатель применения монолитного бетона и железобетона, м<sup>3</sup> [2]

Чтобы дать полное представление о динамике развития монолитного строительства в остальных странах, указанных на рис. 1, авторами в табличной форме приводятся значения по уровню урбанизации, доле применения монолитного бетона и железобетона на тыс. чел. и другие показатели, которые будут использованы в дальнейших исследованиях (табл.).

7	~	~	
Показатели производс	พายสากยพากบสาม	$\Delta CO IO O O O O O O O O O O O O O O O O O$	паэтичых стпачах
токизински произвоес	тоа остопа п	onconcidental o	ризличных стриних

Страна	Доля производимого бетона и железобетона от общего объема бетонных конструкций,	Насе- ление, тыс. чел.	Уровень ур- банизации*, %	Площадь страны*, тыс. км <sup>2</sup>	Значе-
Израиль	95	8 132	91,9	22	0,01168
Турция	89,4	75 627	70,1	781	0,00118
США	72,6	317	82,6	9 519	0,00023
		321			
Япония	71,9	146	67	378	0,00049
		039			
Франция	70,7	63 929	85,9	547	0,00111
Италия	68	59 685	68,6	310	0,00114
Германия	67,7	80 524	74	357	0,00084
Финляндия	65,9	5 456	85,4	337	0,01208
Велико-	62,9	63 888	79,8	245	0,00098
британия					
Россия	60	163	73,2	17 125	0,00037
		655			
Польша	56	38 533	60,9	313	0,00145
Испания	54	46 006	77,6	505	0,00117

<sup>\*</sup> Данные согласно [3].

На основании табличных показателей на рис. 3 и 4 приведена доля применения монолитного бетона и железобетона на тыс. чел. Анализ показывает, что высокоурбанизованная страна Израиль занимает ведущее место в строительстве зданий и сооружений из монолитного бетона. Снизились объемы использования монолитного бетона в Японии, США и Германии. В России, где традиционно наравне с монолитным бетоном используется и сборный железобетон, наоборот, идет резкое увеличение использования монолитного железобетона.

Сопоставление значений, приведенных на рис. 2 и 4, показывает тенденцию увеличения строительства зданий и сооружений из монолитного железобетона в последние десять лет в таких странах, как Финляндия, Польша, Турция, Испания. Это объясняется тем, что монолитные здания обладают целым рядом преимуществ. В силу технологических особенностей они более устойчивы к влиянию техногенных и неблагоприятных факторов окружающей среды, обладают высокой сейсмоустойчивостью, что обеспечивается жесткостью и особой прочностью конструкции.

Именно эти преимущества сделали возможным возведение грандиозных сооружений. Но небоскребы — не только характерный признак современного развитого мегаполиса, центра деловой и политической активности, но также

мощный двигатель развития инновационных технологий монолитного строительства, соревнований инженерной и архитектурной мысли, конструкторских и технологических решений.

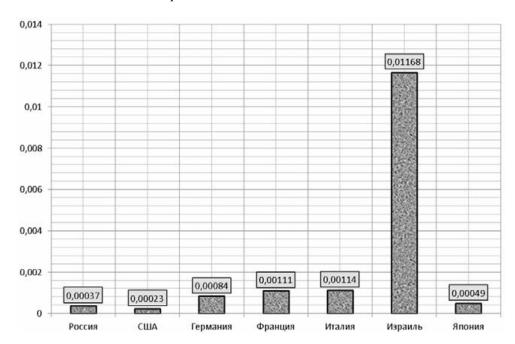


Рис. 3. Доля применения монолитного бетона и железобетона на тыс. чел. для исследуемых семи стран

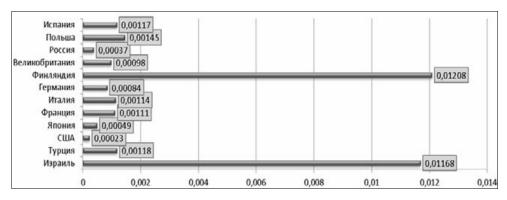


Рис. 4. Доля применения монолитного бетона и железобетона на тыс. чел. для исследуемых двенадцати стран

Технология изготовления бетона для каждого небоскреба имеет свои особенности. Компания Capital Group впервые в истории московского домостроения использовала бетон марки прочности В100, специально разработанной под этот проект. Высокопрочный бетон дал возможность делать сечение несущих колонн на этаже более узким, что, в свою очередь, позволило без ущерба для опорных характеристик сократить толщину конструкций [4]. При возведении 828-метрового небоскреба «Бурдж Халифа» в Дубае только на устройство фундамента было использовано 45 000 м<sup>3</sup> бетона, в который

добавляли лед с учетом климатических особенностей страны, а также микрокремнезем для увеличения прочности бетона. Для устройства фундамента каждой из 452-метровых башен-близнецов Petronas Towers в Куала-Лумпуре использовали 13 000 м<sup>3</sup> бетона, при этом в бетон добавляли кварц. Большой объем бетона потребуется при возведении фундамента первого петербургского небоскреба «Лахта центр», по расчетам — 46 000 м<sup>3</sup>.

Возведению сверхгигантских сооружений из стали и монолитного бетона способствует увеличение населения городов (уровень урбанизации) в условиях недостатка земли: Израиль, Франция, Финляндия (см. табл.). Не менее ярким примером является также столица небоскребов Дубай.

На рис. 1 не указаны страны, доля монолитного строительства в которых составляет более 98 %, например Китай, где в таких мегаполисах, как Шанхай, Пекин, Харбин и др. основной упор делается на строительство небоскребов из монолитного железобетона — в местности, где сейсмоактивность достигает до 8—9 баллов. Китай по количеству самых высоких сооружений занимает первое место в мире. Об этом свидетельствует возведение зданий Шанхайского всемирного финансового центра высотой 492 м (4-е место в мире), Международного коммерческого центра в Гонконге высотой 484 м (5-е место в мире), финансового центра Наньцзин Гринлэнд: в башне высотой 450 м разместился деловой центр китайского города Нанкин (7-е место в мире), небоскреба Кіпдкеу-100 в Шэньчжэнь высотой в 441,8 м (9-е место в мире), Международного финансового центра Гуанчжоу высотой 437,5 м (10-е место в мире). Необходимо отметить, что перечисленные здания построены в последние пять лет.

Сейчас проектируются не менее грандиозные сооружения, что свидетельствует о перспективе применения монолитного бетона и развития высочайших технологий их возведения.

Эффективность монолитного строительства во многом зависит от совершенствования опалубочных систем — систем, требующих на современном этапе развития монолитного строительства как технического сопровождения, так и программного обеспечения. Опалубочные системы — сложные конструкции, состоящие из формообразующих, поддерживающих, соединительных, технологических и других элементов.

Опалубки классифицируются по ряду признаков, но, к сожалению, до настоящего времени нет универсальной классификации. Это связано с тем, что скорость внедрения инновационных опалубочных систем намного уступает скорости разработки нововведений в области опалубочных систем: по прогнозам ученых примерно 4—5 раз.

Авторами статьи выполнена новая классификация опалубочных систем с учетом отечественного опыта развития монолитного строительства и зарубежного опыта развития опалубочных систем. По мере развития опалубочных систем в дальнейшем разработанная классификация должна быть изменена и усовершенствована. В качестве отправной точки классификации были использованы материалы [5—7]. Необходимость пересмотра существующей классификации связана со следующими обстоятельствами:

предложенные в работах [5, 6, 8] классификации выполнены на основании недействующего ГОСТ 23478—79 «Опалубка для возведения монолитных бетонных и железобетонных конструкций. Классификация и общие технические требования»;

действующий государственный стандарт по опалубочным системам введен в действие с 2006 г., а рынок производства опалубочных систем за последние пять лет сделал значительный скачок.

Учитывая отечественный опыт развития монолитного домостроения и зарубежный опыт развития опалубочных систем, разработанная авторами классификация рассматривает не только признаки, но и тип, подтип, характеристику, область и особенности применения опалубочных систем. На рис. 5 приводится только часть классификации. На рис. выделены блоки, дополненные авторами, соответствующие каждому признаку, тип и подтип опалубки также дополнены.



Рис. 5. Предлагаемая классификация опалубочных систем

На сегодняшний день ведущими зарубежными фирмами — разработчиками и производителями опалубочных систем, такими как Aluma Systems (Канада), DALLI, NOE, MEVA, PERI, THYSSEN HUNNEBECK (Германия), DOKA (Австрия), FARESIN (Италия), Outinord (Франция), PILOSIO (Италия), BAUMA (Польша) и др., а также отечественными производителями «ДВК-Е», НТЦ «Стройопалубка», ЦНИИОМТП, «Сталформ Инжиниринг», «Опалубка рус-«Крамос Инжиниринг» (Москва), «Маркетинг-центр "Арсенал"», «СтройМеталКонструкция» (Санкт-Петербург), «Старооскольская опалубка» (Старый Оскол), ФГУП «ПО "Баррикады"» (Волгоград) и другими предлагается 44 типа опалубочных систем, подтипов опалубок на 2—3 порядка больше. Выбор из такого количества опалубочных систем — не простая задача, кроме экономических составляющих необходимо учесть и технологические: продуманность замков и элементов крепления, герметичность формообразующих поверхностей, трудоемкость монтажа, демонтажа, быстроразъемность соединительных элементов, возможность устранения зазоров в элементах опалубки и т. д.

Создание базы данных с цифровым или буквенным обозначением признаков классификации, типа, подтипа, области и особенностей применения в сочетании с экономическими и экологическими характеристиками и правильная индексация современных опалубочных (отечественных и зарубежных) систем позволит выбрать необходимую опалубку с учетом конструктивных особенностей строящихся зданий, их функционального назначения и т. д. Индексация должна соответствовать международным стандартам, т. е. содержать коды стран и компаний (фирм) производителей. Необходимо отметить, чем меньше стоимость опалубки, тем более трудоемок процесс устройства опалубки и распалубки.

Приведем трудозатраты на устройство различных опалубочных систем при устройстве монолитных плит перекрытий зданий различных в плане конфигураций (рис. 6), выполненные на основании исследований [9, 10].

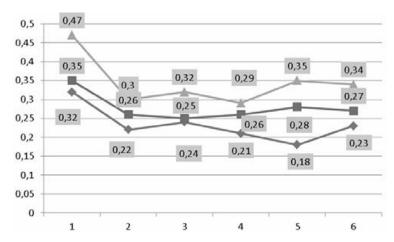


Рис. 6. Трудозатраты на устройство опалубки монолитных перекрытий для зданий: прямоугольных в плане (◆); трапециевидного (■) и сложного (▲) очертаний: 1 — ЦНИИОМТП; 2 — MEVA; 3 — Outinord; 4 — Aluma Systems; 5 — несъемная опалубка из тонких железобетонных плит; 6 — то же, из стального профнастила

Как видно из графиков, опалубочные системы Aluma Systems и MEVA — самые технологичные с точки зрения их сборки. Из существующего многообразия опалубочных систем MEVA имеет самую высокую цену, считается, что

это устаревшая и тяжелая (по массе) система. Но надежность, качество изготовления, хорошая инженерия, антикоррозионная защита, оборачиваемость этих систем обеспечивают их использование при возведении самых уникальных и ответственных зданий и сооружений: Бурдж Халифа (ОАЭ), здание Q1 — апартамент Тауэр (Австралия), культурный и художественный центр Дебрецена (Венгрия), гидросооружение Лох Катрин (Шотландия), мост на скоростной автотрассе Лидса (Англия) и др.

При возведении небоскребов невозможно подавать бетонную смесь на самые верхние этажи, поэтому устраиваются промежуточные бетонные станции на средних этажах, и с помощью мощных помп бетон подается на проектные отметки. Учитывая надежность опалубочных систем MEVA, можно изготовить пакет плит перекрытий на промежуточных отметках и далее поднять их на проектные отметки по направляющим опорам, в качестве которых могут быть использованы монолитные стволы ядер жесткости и железобетонные колонны.

Трудозатраты на устройство несъемной опалубки для зданий сложной конфигурации увеличиваются. В России доля монолитного строительства в несъемной опалубке составляет всего 8,7 % [11]. При этом до последнего времени основная доля приходилась на несъемную опалубку из пенополистирольных блоков швейцарской фирмы Plastbau, хотя отечественных производителей пенополистирольных несъемных опалубок тоже немало: «ААБ» («КАН-СТРОЙ ГРУП», Москва), ЗАО «Изодом-2000» («Интеко», Москва), «Стройсервис-2000» (ООО «Стройсервис», Санкт-Петербург). Существуют также несъемные опалубки из цементно-стружечных плит, щепоцементных плит и блоков (технологии Durisol и Velox), фибролита, ДСП. Практика показывает, что несъемную опалубку применяют при строительстве малоэтажных и зданий средней этажности. Низкая цена пенополистирольных опалубок позволила завоевать рынок во всем мире, но цена — единственное достоинство этих опалубок. Перечисленные выше опалубки также не смогут обеспечить капитальность и надежность строений. Учитывая преимущества монолитного бетона, необходимо создать несъемные опалубочные блоки из монолитного бетона именно для малоэтажных зданий. Для архитектурной выразительности строящихся объектов наружная часть опалубки может иметь рельефную поверхность. Создав формообразующие структуры с различными рельефными матрицами и размерами (ширина должна соответствовать ширине или ½ ширине стены), окрасив наружную часть высокопрочными фасадными красками различных цветов, можно возвести не только прочные и долговечные, но и архитектурно выразительные здания. В качестве заполняющей смеси можно использовать керамзитобетонную смесь (так как керамзит является одним из лучших утеплителей) либо другие бетонные смеси. При этом технология укладки опалубочных блоков может быть аналогичной технологии кладки кирпича.

**Вывод.** Экономичность возведения зданий и сооружений из монолитного бетона и железобетона, их долговечность, минимальные сроки строительства, небольшой вес зданий по сравнению со зданиями из других материалов, в частности кирпичных, возможность выполнения работ в различных климатических условиях и в стесненных условиях, индивидуальность, возведение зданий различной высоты и функционального назначения, применение инновационных технологий способствуют не только развитию монолитного строительства, но и разработке и внедрению новых опалубочных систем.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Адамцевич А. О., Пустовгар А. П.* Оптимизация организации производственных процессов монолитного строительства // Вестник МГСУ. 2013. № 11. С. 242—248.
- 2. Технико-экономическое обоснование и коммерческая оценка серии инновационных проектов монолитного строительства БПК. URL: http://www.volgadmin.ru/RU/MPDevelopment/StrategyPlanning (дата обращения: 14.11.2013).
- 3. Список стран по населению. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki (дата обращения: 14.11.2013).
- 4. Высокие решения. Современные технологии в строительстве небоскребов. URL: http://www.gazeta.ru/realty/2013/11/06 a 5740893.shtml (дата обращения: 14.11.2013).
- 5. ГОСТ Р 52086—2003. Опалубка. Термины и определения. URL http://snipov.net/c\_4669\_snip\_105602.htm// (дата обращения: 24.11.2013).
  - 6. Анпилов С. М. Опалубочные системы для монолитного строительства. М.: АСВ, 2005. 280 с.
  - 7. NOE-Schaltechnik. URL: http://www.noe.de (дата обращения: 24.11.2013).
- 8. *Красный Д. Ю., Красный Ю. М.* Обеспечение качества при возведении зданий и сооружений из монолитного железобетона. Екатеринбург: Центр качества строительства, 2003. 448 с.
- 9. *Амбарцумян С. А., Мартиросян А. С., Галумян А. В.* Нормы выполнения опалубочных работ при скоростном монолитном домостроении // Промышленное и гражданское строительство. 2009. № 2. С. 39—41.
- 10. Зиневич Л. В., Галумян А. В. Некоторые организационно-технологические особенности современного скоростного монолитного домостроения // Вестник МГСУ. 2009. № 1 (спецвыпуск). С. 29—30.
- 11. Практика строительства с применением несъемной опалубки. URL: http://www.newchemistry.ru (дата обращения: 17.11.2013).
- 1. Adamtsevich A. O., Pustovgar A. P. Optimizatsiya organizatsii proizvodstvennykh protsessov monolitnogo stroitel'stva // Vestnik MGSU. 2013. № 11. S. 242—248.
- 2. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie i kommercheskaya otsenka serii innovatsionnykh proektov monolitnogo stroitel'stva BPK. URL: http://www.volgadmin.ru/RU/MPDevelopment/StrategyPlanning (data obrashcheniya: 14.11.2013).
- 3. Spisok stran po naseleniyu. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki (data obrashcheniya: 14.11.2013).
- 4. Vysokie resheniya. Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve neboskrebov. URL: http://www.gazeta.ru/realty/2013/11/06\_a\_5740893.shtml (data obrashcheniya: 14.11.2013).
- 5. GOST R 52086—2003. Opalubka. Terminy i opredeleniya. URL: http://snipov.net/c\_4669\_snip\_105602.htm (data obrashcheniya: 24.11.2013).
  - 6. Anpilov S. M. Opalubochnye sistemy dlya monolitnogo stroitel'stva. M.: ASV, 2005. 280 s.
  - 7. NOE-Schaltechnik. URL: http://www.noe.de (data obrashcheniya: 24.11.2013).
- 8. Krasnyy D. Yu., Krasnyy Yu. M. Obespechenie kachestva pri vozvedenii zdaniy i sooruzheniy iz monolitnogo zhelezobetona. Ekaterinburg: Tsentr kachestva stroitel stva, 2003. 448 s.
- 9. *Ambartsumyan S. A., Martirosyan A. S., Galumyan A. V.* Normy vypolneniya opalubochnykh rabot pri skorostnom monolitnom domostroenii // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2009. № 2, S. 39—41.
- 10. Zinevich L. V., Galumyan A. V. Nekotorye organizatsionno-tekhnologicheskie osobennosti sovremennogo skorostnogo monolitnogo domostroeniya // Vestnik MGSU. 2009. № 1 (spetsvypusk). S. 29—30.
- 11. Praktika stroitel'stva s primeneniem nes"emnoy opalubki. URL: http://www.newchemistry.ru (data obrashcheniya: 17.11.2013).

© Абрамян С. Г., Ахмедов А. М., Халилов В. С., Уманцев Д. А., 2014

Поступила в редакцию в январе 2014 г.

# Ссылка для цитирования:

Развитие монолитного строительства и современные опалубочные системы / С. Г. Абрамян, А. М. Ахмедов, В. С. Халилов, Д. А. Уманцев // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 231—239.

# ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА

УДК 504.5(470.45)

С. Г. Абрамян, В. И. Атопов, А. М. Ахмедов, Е. Н. Беспалая

# ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ВОЛГОГРАДА: ПРОБЛЕМЫ, СКРЫТЫЕ ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Рассматриваются основные причины ухудшения экологической ситуации в Волгограде. Приведены основные источники загрязнения биосферных оболочек земли в городе. С учетом выбросов промышленных предприятий и автомобильного транспорта приведены загрязнители, приоритетные для каждого административного района. По ГИС-картам выявлены экологически опасные районы города с учетом скрытых источников загрязнения.

Ключевые слова: экология города, источники загрязнения, отходы, экологическая безопасность, атмосферный воздух, почвенные и водные ресурсы.

The article describes the basic problems which make the ecological situation in Volgograd worse. Main sources of pollution of biospheric earth mantles in the city are shown. Taking into account the industrial emissions and those of road transport, the major pollutants are listed for each administrative district. Environmentally hazardous city areas regarding hidden sources of pollution are revealed with the help of GIS-maps.

 $K\,e\,y\,$  words: urban ecology, sources of pollution, wastes, environmental safety, air, soil and water resources.

Характеризуя сегодняшнюю экологическую обстановку Волгограда, принято называть ее сложной, неудовлетворительной. Подтверждением является повышение содержания пыли, диоксида азота, оксида углерода, фторида водорода, фенола, аммиака, формальдегида, хлорида кислорода в атмосфере. Еще в 30-х годах прошлого века в целях защиты города и окрестных населенных пунктов от пыльных бурь было начато лесоразведение. Созданные с большим трудом из-за сложных природно-климатических условий зеленые насаждения, предназначенные также для борьбы с эрозией почв, облесения песков и оврагов, обеспечения жителей фруктами и ягодами, а также создания мест отдыха, во время Сталинградской битвы практически полностью были уничтожены. Согласно [1], количество зеленых насаждений на территории Волгограда в настоящее время меньше нормативной величины: «На одного жителя площадь зеленых насаждений в среднем составляет 10,8 м² при норме 25,0 м². Сегодня Волгоград потребляет кислорода больше, чем его производят городские зеленые насаждения».

По другим данным [2], в воздушный бассейн Волгограда выбрасывается более 200 ингредиентов загрязняющих веществ. Основными источниками являются крупные промышленные предприятия электроэнергетики, черной и цветной металлургии, нефтепереработки, химии, стройматериалов и транспорт, т. е. не скрытые источники загрязнения (рис. 1).

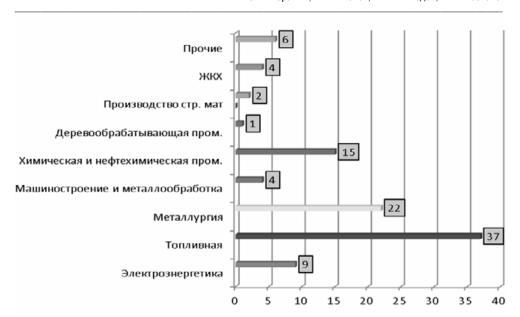


Рис. 1. Структура атмосферных выбросов по отраслям экономической деятельности Волгограда, %

Выбросы загрязняющих веществ в основном происходят из-за аварийных ситуаций, являющихся следствием изношенности основных фондов. Поэтому в сложившейся к настоящему времени ситуации, когда значительная часть основных фондов на территории России и, в частности, Волгограда устарела, модернизация, реконструкция и капитальный ремонт последних приобретают архиважное значение не только для оздоровления экономики в целом, но и для улучшения экологической ситуации.

Если учитывать экологический фактор, то с развитием промышленности, обусловливающей экономический рост, макросистема национального хозяйства не стала устойчивой. Взамен экзогенных факторов неустойчивости, порождаемых в основном природой и не управляемых человеком, современному хозяйству стали угрожать эндогенные факторы неустойчивости, созданные руками самого человека. Таким образом, к природным катаклизмам добавляется возможность возникновения различных аварий. В итоге получается, какими бы ни были цели и принципы общественного развития, возникновение противоречий между человеком и природой, между производством и естественными экологическими системами неизбежно. Главная задача состоит в том, чтобы минимизировать возникающие противоречия, предотвратить деградацию природной среды, ухудшение экологической обстановки.

Транспортные выбросы [2] в атмосферу на главных автомагистралях в связи с интенсивностью движения настолько значительны, что в некоторых районах превышают ПДК (рис. 2).

Автомобильный парк Волгограда к концу 2013 г. составил более 250 тыс. единиц, 70...75 % из которых — транспорт индивидуальных владельцев, не контролирующих выбросы загрязняющих веществ в атмосферу и не осуществляющих плату за загрязнение окружающей природной среды.

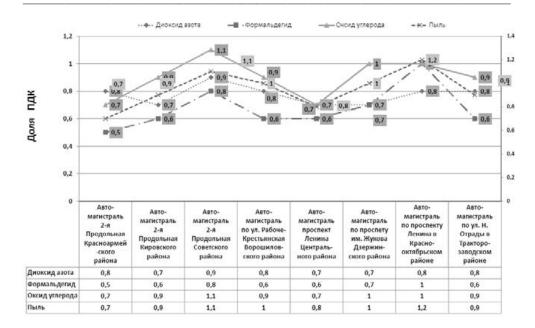


Рис. 2. Средний уровень загрязнения атмосферного воздуха вдоль главных автомагистралей Волгограда за 2012 г.

Известно, что чем больше мощность двигателя машин, срок их эксплуатации, скопление машин на перекрестках, неудовлетворительное состояние дорог, использование топлива несоответствующего качества, тем больше загрязняющих веществ попадает в атмосферу. Учитывая, что автомагистрали 2-я и 3-я Продольные являются дорогами для движения также больших грузовых машин, соединяют многие федеральные дороги, можно представить экологическое состояние районов города, где проходят указанные магистрали. Установлено, что в связи с интенсивностью движения машин на участке автомагистралей «Спартановка — ул. Рокоссовского — Кировский район» превышение выбросов ПДК оксида углерода в 4 раза выше. Подобная же ситуация на трассе им. маршала Жукова. Уровень шума на названных магистралях достигает до 65 дБ, достигая 80 дБ на перекрестке проспекта им. маршала Жукова и 3-ей Продольной [1].

С учетом выбросов промышленных предприятий и автомобильного транспорта по данным [3] составлена табл. 1, где указаны загрязнители, приоритетные для каждого района. Контроль над состоянием атмосферного воздуха в городе осуществлялся на 8 стационарных постах, оснащенных автоматическими средствами измерения, в 2012 г.

Как видно из таблицы, основными загрязнителями во всех районах города по удельному весу являются взвешенные вещества, диоксид серы, диоксид азота. С уверенностью можно сказать, что все-таки основной источник загрязнения — автомобильный транспорт. Во-первых, это связано с линейным градостроительным характером города (наличие 1-й и 2-й Продольных автомагистралей), во-вторых, не во всех районах действуют мощные промышленные предприятия.

Таблица 1 Загрязнители атмосферного воздуха в административных районах города

Районы	Тракто-	Крас-	Дзер-	Цен-	Воро-	Co-	Ки-	Крас-
Загрязнители	роза- водский	тябрь- ский	жин- ский	траль- ный	вский	вет- ский	ров- ский	мей- ский
Диоксид азота	2	2	3	3	2	3	3	3
Оксид азота	3	4	4		3	4	_	_
Оксид углерода	4	7	6	7	5	6		10
Диоксид серы	5	1	2	2	6	2	2	2
Сероводород	6	3		4	7		4	4
Озон	7	_	5	_	4	5	_	_
Взвешенные вещества	1	8	1	1	1	1	1	1
Сажа	_		_	5	_		_	8
Формальдегид	_	6	_	6	_	1	_	
Фенол	_	9	_	_			5	5
Хлорид водорода	_	_	_	_		_	6	6
Фторид водорода		5	_	_	_		_	7
Аммиак	_	_		_		_		9

Промышленные и бытовые отходы загрязняют литосферу и гидросферу сильно и непрерывно. Волга является основным приемником сточных вод и одновременно единственным источником питьевого водоснабжения. Она сверхнормативно загрязнена нефтепродуктами, фенолами, солями тяжелых металлов. Основными источниками загрязнения являются сточные воды, сбрасываемые в основном без очистки. Следующий фактор — это поступление загрязняющих веществ из промышленных центров, расположенных выше по течению Волги. Анализ отраслевой структуры общего сброса сточных вод показывает, что 95 % от общего объема сбрасывания производится предприятиями жилищно-коммунального хозяйства.

Сложная экологическая ситуация города связана также с полным и частичным уничтожением естественных оврагов Долгий, Банный, Крутой, Касимовский, Иркутский, Ставропольский, Дедушенковский и др., в результате чего нарушился уровень грунтовых вод, появились подтопление, заболачивание в различных районах города. Существующие ранее естественные овраги были результатом тектонических разломов литосферы, ибо природа заранее заботилась о саморегуляции. Последствием варварского антропогенного вмешательства стало подтопление сотен участков в Тракторозаводском (Спартановка), Краснооктябрьском (Вишневая Балка), Ворошиловском (Дар-гора), Кировском (Бекетовка), Красноармейском (в окрестностях Волго-Донского судоходного канала) районах города, которое, в свою очередь, привело к просадкам пород, искусственному оврагообразованию и оползневым явлениям. Благоприятствуют развитию оползней в Волгограде и наличие уклона пластов к Волге, большой перепад высот, размыв Волгой правого берега.

Еще одной причиной образования искусственных оврагов в Волгограде являются утечки воды из водонесущих инженерных коммуникацией и неразвитость системы ливневой канализации. Именно искусственные овраги в настоящее время являются местом образования стихийных и несанкционированных свалок.

Согласно данным [1], «ориентировочная площадь стихийных свалок составляет около 95 га городских земель», что эквивалентно почти 1 % площади города. По другим данным [4], в 2012 г. площадь ликвидированных несанкционированных свалок по Волгограду составила 335 200,0  $\text{m}^2$ , объем мусора — 31 339,0  $\text{m}^3$ . Иначе говоря, на 1  $\text{m}^2$  свалки приходилось 0,09  $\text{m}^3$  мусора. Много это или нет? Если представим, что в квартире общей площадью  $100 \text{ m}^2$  1  $\text{m}^2$  завален 9 кг бытового мусора, который месяцами не убирается, то картина станет понятной.

Опасными экологическими факторами становятся в настоящее время стихийно возникшие и вполне легальные автомойки, предприятия по монтажу автомобильных шин, ремонту, техническому обслуживанию различных автомашин (рис. 3, 4 и табл. 2).

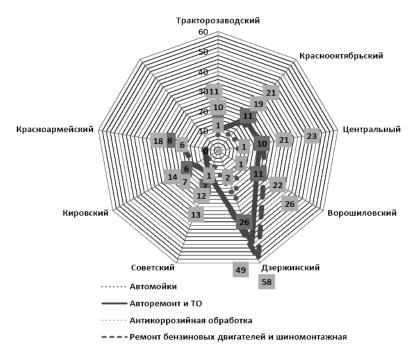


Рис. 3. Сведения по количеству автомоек, постов ремонта и техобслуживания машин по каждому административному району Волгограда



Рис. 4. Количество автозаправок по каждому административному району Волгограда

 $\label{eq:Tadelta} T\, a\, \delta\, \pi\, u\, u\, a\, \, \, 2$  Плотность загрязняющих источников $^*$  в административных районах Волгограда

Районы Волгограда		Население, чел.	Количест-	Количество	Количество
	Пло- щадь, км <sup>2</sup>		во загряз-	загрязняю-	загрязняю-
			няющих	щих источ-	щих источ-
			источни-	ников на ед.	ников на
			ков	площади*	1 чел.*
Тракторозаводский	54	138 848	52	0,96	0,0004
Краснооктябрьский	34,2	150 912	69	2,02	0,0005
Центральный	11,2	83 266	65	5,80	0,0008
Дзержинский	85,8	183 411	168	1,96	0,0009
Ворошиловский	27,8	82 666	73	2,63	0,0009
Советский	63	138 848	50	0,79	0,0004
Кировский	71,5	109 365	47	0,65	0,0004
Красноармейский	230	168 188	46	0,2	0,0003

<sup>\*</sup> Загрязняющие источники — автомойки, предприятия по ремонту и техобслуживанию, антикоррозийной обработке машин, шиномонтажные и автозаправочные станции.

Общее количество загрязняющих источников, согласно ГИС-картам, по городу составляет 570 единиц, а парки отдыха можно посчитать на пальцах одной руки.

Согласно этим данным, Центральный, Ворошиловский, Краснооктябрьский и Дзержинский районы Волгограда входят в зону риска. Наиболее благоприятными являются Красноармейский, Кировский, Советский районы (рис. 5).

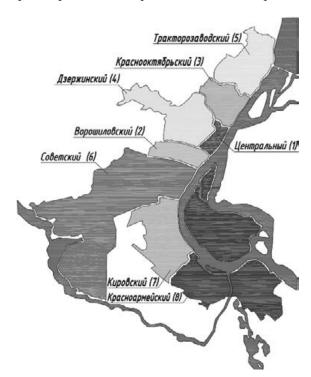


Рис. 5. Карта Волгограда с административными районами

Резкий рост числа автомоек, автохимчисток и других загрязняющих предприятий напрямую связан с ростом машин. Поэтому вполне вероятно, что стихийно возникшие загрязняющие источники, расположенные во дворах частных домов и в гаражах, действуют нелегально. Значит, отсутствуют очистные сооружения, и после промывки машин вода с высокой концентрацией вредных примесей — бензина, масла, нефтепродуктов, тяжелых металлов — поступает в основном в почву через свободные поля фильтрации — тротуары, газоны и т. д., а иногда через канализацию в водоемы.

Все время считалось, что Ворошиловский район города с экологической точки зрения самый безопасный. Да, в районе нет действующих заводов, приносящих большой вред, но очевидно, что район (рис. 5) не является экологически безопасным. В Центральном районе города на 1 км<sup>2</sup> территории приходится около шести учтенных загрязняющих источников (см. табл. 2).

По количеству загрязняющих источников на одного человека Центральный, Ворошиловский, Краснооктябрьский, Дзержинский районы города являются самыми опасными, что подтверждается также исследованиями [3], согласно которым по общей заболеваемости подросткового населения Центральный район занимает первое место, взрослого населения — второе место. Ворошиловский район занимает первое место по общей заболеваемости детского населения.

Почвенные ресурсы Волгограда загрязнены различными тяжелыми металлами. В контролируемых почвах особо охраняемых территорий обнаружено превышение ПДК: в южной части города — формальдегида до 8,9 раза, в центральных и северных районах Волгограда — до 1,5 раза. В Красноармейском и Кировском районах выявлено превышение водорастворимых фторидов в 1,75—2,3 раза, на территории Григоровой балки (особо охраняемая природная территория — региональный заказник) выявлено превышение содержания фенола в почве в 1,3 раза предельно допустимого количества [2].

Неудовлетворительная экологическая ситуация Волгограда скорее всего связана с тем, что за все время существования города ко всем жизнеобеспечивающим биосферным оболочкам люди относились потребительски.

Вывод об экологической безопасности административных районов города можно сделать только при общем экологическом мониторинге, с учетом всех действующих крупных и мелких заводов, предприятий обслуживающего сектора, интенсивности движения машин и т. д., т. е. с учетом воздействия всех источников загрязнения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Арестова Н. В., Брылёв В. А., Дьяченко Н. П.* География и экология Волгоградской области : учеб. пособие. 3-е изд. перераб. и доп. М. : Глобус, 2010. 152 с.
- 2. Доклад «О состоянии окружающей среды Волгоградской области в 2012 году». Волгоград : СМОТРИ, 2013. 300 с.
- 3. Оценка влияния факторов среды обитания на здоровье населения города Волгограда по показателям социально-гигиенического мониторинга в 2012 году. URL: http://34.rospotrebnadzor.ru/s/34/files/directions/monitoring/97243.pdf (дата обращения : 14.01.2014).
- 4. Стратегический план устойчивого развития Волгограда до 2025 года. URL: http://www.volgadmin.ru/RU/MPDevelopment/StrategyPlanning (дата обращения : 14.01.2014).
- 1. *Arestova N. V., Brylev V. A., D'yachenko N. P.* Geografiya i ekologiya Volgogradskoy oblasti : ucheb. posobie. 3-e izd. pererab. i dop. M. : Globus, 2010. 152 s.

- 2. Doklad «O sostoyanii okruzhayushchey sredy Volgogradskoy oblasti v 2012 godu». Volgograd : SMOTRI, 2013. 300 s.
- 3. Otsenka vliyaniya faktorov sredy obitaniya na zdorov'e naseleniya goroda Volgograda po pokazatelyam sotsial'no-gigienicheskogo monitoringa v 2012 godu. URL: http://34.rospotrebnadzor.ru/s/34/files/directions/monitoring/97243.pdf (data obrashcheniya : 14.01.2014).
- 4. Strategicheskiy plan ustoychivogo razvitiya Volgograda do 2025 goda. URL: http://www.volgadmin.ru/RU/MPDevelopment/StrategyPlanning (data obrashcheniya: 14.01.2014).

© Абрамян С. Г., Атопов В. И., Ахмедов А. М., Беспалая Е. Н., 2014

# Поступила в редакцию в феврале 2014 г.

#### Ссылка для цитирования:

Экологическое состояние Волгограда: проблемы, скрытые источники загрязнения / С. Г. Абрамян, В. И. Атопов, А. М. Ахмедов, Е. Н. Беспалая // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 240—247.

УДК 712(470.45)

### С. А. Матовников, В. Н. Анопин, Н. Г. Матовникова

# ЛАНДШАФТНО-АРХИТЕКТУРНЫЕ МЕТОДЫ В ЗЕЛЕНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ВОЛГОГРАДСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

Приведены результаты анализа планировочной структуры и образующихся в результате взаимодействия города и ландшафта условий произрастания зеленых насаждений Волгограда и его окрестностей. Предложены наиболее приемлемые в зеленом строительстве методы ландшафтной архитектуры.

К л ю ч е в ы е с л о в а: ландшафтная архитектура, планировочная структура, рекреация, зеленые насаждения, функциональные зоны.

The results of the analysis of planning structure and produced as a result of interaction between the city and the landscape conditions for growth of green plantings in Volgograd and its suburbs are provided. The methods of landscape architecture most used in green construction are offered.

 $K\,e\,y\,$  words: landscape architecture, planning structure, recreation, green plantings, functional zones.

В настоящее время процессы деградации природной среды на многих городских и пригородных землях достигли критического предела. Рост автомобильного парка, интенсификация развития всех видов городского хозяйства, электронных средств связи, увеличение рекреационного воздействия на биоту, продолжающиеся выбросы промышленными предприятиями поллютантов ведут к системному экологическому кризису ландшафтов урбанизированных территории. В результате ухудшается здоровье и снижается работоспособность населения. В динамике последних лет общая заболеваемость населения Волгограда по всем возрастным группам имеет устойчивую тенденцию к росту: у подросткового населения за период 2002—2011 гг. — 27,6 % и в меньшей степени у взрослого населения. При этом у всех возрастных категорий показатели заболеваний в городе были выше, чем в целом по области [1].

Наиболее эффективными и экологичными методами преобразования деградированных урболандшафтов в культурные, отвечающие потребностям населения крупных городов и агломераций, являются методы ландшафтной мелиорации и рекультивации, включающие озеленение селитебных и промышленных территорий, а также создание лесных массивов защитного и рекреационного назначения, лесомелиорацию пригородных земель. При этом ландшафтное строительство должно выполняться на основе учета не только общей планировки городов, городских районов и микрорайонов, но и архитектуры отдельных зданий, сооружений и их комплексов. Также необходимым обоснованием являются данные анализа природных условий территории Волгоградской агломерации, в целом малоблагоприятные и еще более ухудшающиеся под воздействием процессов урбанизации [2].

При планировке городов наряду с решением вопросов рекреационного и защитного преобразования ландшафтов серьезное значение придается эстетической стороне градостроительного решения. Наиболее существенно влияют на планировочную структуру Волгограда и его окрестностей крупные элементы ландшафтных комплексов, открытые городские пространства. Значительные

территории неудобий (склоны, заболоченные и заросшие тростником и камышом участки с близким расположением грунтовых вод, овраги, поймы рек Царицы, Мечетки), а также крупных суходолов и балок до настоящего времени остаются практически неокультуренными. Во многих местах они расчленяют территорию города на своего рода автономные территориальные микрорайоны. Отдельные открытые пространства существуют в городе обособленно, не соединяясь в какую-либо систему (участки с выходом грунтовых вод, старые кладбища и т. д.).

Многие прибрежные городские территории в районе акватории Волги обустроены недостаточно качественно для города с миллионным населением. Их рекреационный ресурс используется не рационально. Нет самых простых форм городского благоустройства: мощеных пешеходных дорожек, организованных спусков, мест для отдыха, урн для мусора или мусорных контейнеров и пр. (рис. 1).



Рис. 1. Некоторые примеры нерационального рекреационного использования городских акваторий и открытых городских пространств

В городах сухостепной зоны значительное преобразование исходного природного комплекса происходит с самого начала их строительства, так как состояние естественного ландшафта не обеспечивает благоприятных условий для жизни, деятельности и отдыха городского населения. Исходный ландшафт (микрорельеф, почвенный покров, растительность) преобразуется почти одновременно на значительной площади строящегося города. Таким образом, территория города становится антропогенным элементом, внедряемым в природную среду.

Различного рода планировочные работы при строительстве и развитии инфраструктуры городов приводят к изменению ландшафтных компонентов. В первую очередь меняются наименее устойчивые из них — растительность и почвы. Следствием роста, развития и реконструкции города (строительства новых зданий и сооружений, автомобильных дорог, трамвайных и троллейбусных линий, прокладки подземных линий коммуникаций и т. д.) является необходимость непрерывного процесса архитектурно-ландшафтной реконструкции.

Для достижения эффективности этой реконструкции, в т. ч. мелиоративных и рекультивационных работ, следует исходить из того, что каждый из компонентов создаваемого ландшафта является в определенной степени

самостоятельным регулятором состояния городской среды. Выполняя планировку микрорельефа, изменяя уровень грунтовых вод, видовой состав растительности, снижая объем стоков недостаточно очищенных вод предприятий промышленности, проводя мероприятия по благоустройству городских территорий и акваторий, можно добиться улучшения качества среды в определенном конкретном направлении.

Одним из важнейших критериев соответствия состояния, структуры и видового состава зеленых насаждений их назначению являются санитарногигиенические условия городского пространства, образующиеся в результате высокой концентрации людей в пределах относительно небольшой территории. Соблюдение норм, регламентирующих необходимую чистоту воздуха и воды, в т. ч. содержание поллютантов, не превышающее уровень предельно допустимой концентрации, — залог обеспечения здоровья населения.

В Волгограде в течение значительного времени рассматривается вопрос вывода сильно загрязняющих природную среду промышленных предприятий из центральных районов города на окраины или за пределы городской черты, внедряются разнообразные технологии очистки различных вредных отходов промышленных производств, некоторые производства постепенно превращаются в малоотходные. Однако полное решение этой проблемы в ближайшее время не представляется возможным. Положение усугубляется быстрым ростом автомобильного парка, увеличением выброса вредных ингредиентов выхлопных газов.

При градостроительном проектировании, решая экологические вопросы, необходимо учитывать специфические черты городского микроклимата — снижение скорости ветра, повышение турбулентности воздушных потоков и температуры воздуха, увеличение выпадения осадков. Нужно исходить из характера загрязнения атмосферного воздуха и его последствий, в частности образования в определенных местах «линз» загрязненного воздуха и сокращения солнечной радиации (по некоторым данным, потери видимой радиации для сильно загрязненных районов могут составлять до половины, а ультрафиолетовой радиации — до 80 %) [3]. Для обеспечения комфортных метеоусловий градостроительные решения следует принимать в масштабе всего города или агломерации: нормировать баланс застроенных и озелененных территорий, выполнять соответствующее функциональное зонирование, осуществлять регулирование объема движения на транспортных магистралях, строить новые загородные объездные дороги, оптимизировать характер застройки.

Здания и сооружения нагреваются солнцем, что в одних местах снижает, а в других усиливает скорость ветра, воздействуют на распределение осадков, т. е., подвергаясь воздействию природных факторов, сами изменяют их. Это происходит под влиянием функциональных процессов самого города. Так, излучение тепла отапливаемыми зданиями селитьбы и промышленных предприятий, а также городскими коммуникациями и транспортом приводит к тому, что общая температура воздуха в городе (особенно в зимний период) становится значительно выше по сравнению с окрестностями. В летний период в результате полива зеленых насаждений и проезжих частей улиц повышается влажность воздуха и несколько снижается его температура.

Направленные преобразования рельефа и водных систем города, требующие проведения крупных реконструктивных мероприятий, из-за технических и экономических причин не всегда приемлемы. Поэтому как в настоящее время, так и в ближайшей перспективе основным средством регулирования качества городской среды будут являться фитомелиорация и рекультивация, в первую очередь создание высокодекоративных древесных и кустарниковых зеленых насаждений.

Роль озелененных территорий в снижении неблагоприятного воздействия окружающей среды на городское население обусловлена их способностью противостоять негативным для человека факторам как природного, так и техногенного происхождения. К первым можно отнести сильные ветры, перегрев, излишнюю сухость или, наоборот, переувлажнение воздуха, ко вторым — шумы, токсичные выбросы, уменьшенную аэрацию застройки. Но главное: зеленые насаждения способствуют восстановлению качественного состава воздушного бассейна города, поглощая токсичные для здоровья людей эмиссии и углекислый газ, выделяя кислород, а также снижая запыленность атмосферы. В городе всесторонне проявляются свойства древесных растений ионизировать воздух, выделять губительные для болезнетворных микроорганизмов фитонциды и влиять на интенсивность солнечной радиации. Поэтому озелененные участки в городе должны быть достаточно многочисленны и правильно, относительно равномерно распределены по его площади.

Оптимальной считается структура так называемых «зеленых клиньев», которые играют роль защитных зон, ограждающих определенные части города от влияния негативных факторов урбанизации [4]. В Волгограде система озеленения должна быть органически связана и с определяющими ландшафтными факторами, и с исторически сложившейся планировочной структурой.

В градостроительном проектировании можно выделить три аспекта взаимодействия города и ландшафта [5, 6]:

- 1. Территориально-функциональный аспект. Имеет территориальный характер, рассматривая связи и противоречия между смежными городскими территориями разного назначения. Его функциональность состоит в приобретении территориями в процессе их преобразования по направлению к поставленной цели специфического характера. Учет взаимодействия факторов роста и развития города с ландшафтом находит свое выражение в зонировании городской территории и планировании системы ее озеленения. В Волгограде и особенно в Волжском весьма важным является решение вопросов обустройства территорий между смежными зонами, например между селитьбой и промышленной зоной, между селитьбой и транспортными магистралями и т. д. Это обусловливает необходимость проведения ландшафтного анализа по каждому рабочему участку в отдельности с учетом данных анализа смежных территорий.
- 2. Структурно-композиционный аспект. Наиболее удачными бывают решения, когда природные элементы урболандшафта композиционно «усиливают» архитектуру городской застройки, подчеркивают ее своеобразие. Необходимо учитывать особенности рельефа, который является «каркасом» ландшафтного сооружения и в экологическом, и в композиционном отношениях. В сухостепной зоне архитектурно организованный рельеф определяет,

с одной стороны, микроклиматические характеристики участка, в первую очередь распределение влаги и, как следствие, состояние растительности, а с другой — объемно-пространственную структуру озелененного пространства, видовые точки и бассейны видимости. В свою очередь, созданные с учетом положений ландшафтной архитектуры зеленые насаждения подчеркивают объемную структуру рельефа.

Наиболее полный эффект восприятия достигается в тех случаях, когда в урболандшафте в целом соблюден единый архитектурный замысел, насаждения формируются как единый ансамбль со зданиями и сооружениями. При создании каждого объекта ландшафтной архитектуры необходимо обеспечение соответствия разработанной композиции и планировочной ситуации. Для достижения этого используют весь взаимно увязанный арсенал средств планировки рельефа, создания и выращивания зеленых насаждений.

Методы ландшафтной архитектуры в городе определяются параметрами функционального зонирования. Характерные особенности каждой зоны обусловливают специфические экологические и эстетические задачи. Применяемые приемы зависят от природно-климатических условий и градостроительной ситуации, определяющих, в конечном счете, особенности конкретного варианта решения. При этом для создания индивидуального облика Волгоградской агломерации следует исходить из комплекса складывающихся недостаточно благоприятных условий.

3. Временной аспект. При выполнении зеленого строительства следует учитывать то, что ландшафтные композиции находятся в постоянном развитии и изменении. Задачей разработчика является достижение наибольшего декоративного эффекта восприятия объекта ландшафтной архитектуры как в период завершения строительства, так и в будущем, спустя десятилетия. Сезонные и постепенные годовые изменения внешнего облика деревьев, кустарников, цветов, газонных поверхностей происходят в течение всей их жизни. Декоративные и биологические особенности деревьев и кустарников меняются с возрастом, и каждый период их роста и развития имеет свои характерные особенности. В средней полосе композиции с относительно быстрорастущими деревьями достигают декоративного эффекта через 5 лет после посадки, в то время как с медленнорастущими — только через 10 лет. На территории Волгоградской агломерации эти сроки сокращаются в 1,5—2 раза [2].

Ландшафтные композиции следует разрабатывать исходя из «динамики декоративности» деревьев и кустарников, основываясь на сочетании пород деревьев и кустарников со сходной ритмикой биологического развития и эстетической согласованности их формы, структуры и цвета [5, 6].

Территория города отличается от других озеленяемых пространств тем, что его жители в процессе жизнедеятельности и, в первую очередь, рекреации могут «корректировать» выполненный проект озеленения, внося в него свои «поправки», нередко нарушая общий замысел ландшафтной организации территории, меняя функциональное назначение тех или иных участков. Кроме того, жилищное строительство в городах ведется постепенно, отдельными микрорайонами, а нередко даже отдельными зданиями, что также создает определенные трудности в обеспечении завершенности ландшафтноархитектурного облика объекта.

Для достижения необходимого эффекта проект озеленения должен предусматривать использование значительного количества высокодекоративных газо-, пылеустойчивых деревьев и кустарников, посадку которых целесообразно производить относительно плотными, но небольшими по объему группами. Однако, исходя из того, что на большей части Волгоградской агломерации до настоящего времени не решены вопросы создания поливных водоводов, при выборе ассортимента пород древесных растений зачастую приходится преимущественно руководствоваться не столько их декоративными качествами, сколько засухоустойчивостью, устойчивостью к содержанию солей в почве и т. д.

Решение возникающих проблем осложняется невозможностью конструирования единой модели оптимального соотношения городских и природных компонентов, приемлемой в любых условиях, так как определяющее значение имеют конкретные природные факторы обустраиваемой местности.

На территории агломерации с близко расположенными городамиспутниками считается целесообразным выделение зон преимущественного и ограниченного развития. Это город-мегаполис (центр), его рекреационные и защитные насаждения, а также территориальные резервы. Зона ограниченного развития выполняет функции предотвращения полного срастания населенных мест и служит базой для пригородного плодоводства и овощеводства и кратковременного отдыха населения. В соответствии с существующими нормативными положениями для города-центра с населением больше 1 млн жителей ширина этой зоны должна быть не менее 35—40 км. Однако, по нашему мнению, в Волгоградской агломерации выполнение этого положения в обозримой перспективе неосуществимо, так как основная масса поселков и городов-спутников, включая г. Волжский, находятся от границ мегаполиса на расстоянии до 10 км. Сомнительно и обеспечение высокого эффекта в результате создания рекомендуемых зон экологического равновесия — буферных зон на границах региональных систем расселения.

Из изложенного следует, что рациональное решение проблемы развития города и агломерации, обеспечивающее сохранение и улучшение качества природной среды, представляет исключительно сложную задачу. Рост и развитие городов происходят в соответствии со сложившимися обстоятельствами, по внутренним законам, далеко не всегда соответствующим требованиям сохранения и улучшения состояния окружающей среды. В связи с этим все большее внимание должно уделяться выполнению в городской среде мероприятий, обеспечивающих сохранение и повышение биоразнообразия, создание экологически здоровой атмосферы.

В организации силуэта города наряду с рельефом важными природными компонентами в ландшафте городов выступают акватории. В связи с этим в последние годы в градостроительстве особое внимание уделяется прибрежным территориям. Степень их благоустройства определяет такие основные показатели архитектурно-экологического уровня ландшафтной организации, как запоминающийся ассоциативный вид города, эстетика, комфортность проживания горожан и т. д.

Органичная связь архитектуры и природы и, в первую очередь, выразительная взаимосвязь природного облика различных акваторий и расположенных вблизи архитектурных объектов является неотъемлемой особенностью

российского градостроительства. Обусловленный геоморфологическим строением долины Волги, характер градостроительства и архитектурно-художественного облика Волгограда хотя и отличается определенной оригинальностью, но далеко не повсеместно соответствует возможностям и достижениям современной градостроительной и ландшафтной архитектуры. В архитектурно-планировочных разработках необходимы, во-первых, структурно-пространственное формирование отдельных территориально изолированных районов и города в целом (надпойменные террасы, береговые склоны, долины малых рек, балочная сеть); во-вторых, организация эстетического каркаса, в т. ч. выявление визуальных доминат ансамблей застройки, открытых панорамных видов, архитектуры набережной, плотины и сооружений Волжской ГЭС, моста через Волгу, обогащающих силуэт города, как это достигнуто в центральной его части (рис. 2).





Рис. 2. Открывающаяся с Волги живописная панорама Волгограда

Границы прибрежных функциональных зон определяются основными параметрами санитарно-гигиенического, инженерного и архитектурно-композиционного воздействия компонентов реки. Санитарно-гигиенические функции акватории зависят от геоморфологических показателей прилегающих территорий, важнейшими из которых являются особенности рельефа, глубина залегания и режим грунтовых вод, характер грунтов и горных пород, состояние и направленность современных эндогенных процессов, вызванных зарегулированием реки (эрозия, оползни, подтопление, заболачивание и др.).

Анализ Волгоградской градостроительной системы дал основание для вывода, что именно система характерных ландшафтных зон должна найти выражение в архитектурно-планировочной структуре города, а также в формировании его главных архитектурно-композиционных узлов [7].

Создание оптимальных условий жизни населения крупных городов и агломераций возможно только при органичном сочетании в каждом микрорайоне участков, занятых акваториями, зелеными насаждениями и застройкой. Наиболее устойчив к нарушениям и рекреационным нагрузкам мозаичный ландшафт акваторий с чередованием естественных и преобразованных участков.

Индустриальные методы городского строительства часто приводят к снижению привлекательности естественных ландшафтов местности. В настоящее время применяют гибкие планировочные структуры озеленения, способные адекватно реагировать на изменяющиеся градостроительные условия. В результате природные системы озелененных территорий города непрерывно усложняются [2].

В крупных городах имеет место значительная дифференциация объектов системы озеленения по типам, размерам и функциям. Различия применяемых систем обусловлены наличием разнообразных конкретных градостроительных условий: местоположением территории, сложившейся схемой зонирования, размещением жилой застройки, промышленности, средств коммуникаций, общим архитектурно-планировочным решением территории города и перспективой его развития. Важнейшим условием является возможность организации единой системы озелененных пространств города, его зеленого пояса. Разнообразие видов и форм древесных растений представляет широкую возможность выбора средств ландшафтной архитектуры. Основой применения конкретной древесной породы является зрительное восприятие облика дерева или кустарника. Впечатление от сада, бульвара, сквера, парка, лесопарка складывается из восприятия формы, величины и цвета растений, а также их групп и сообществ. Декоративность деревьев и кустарников в первую очередь определяется тем, как они выглядят в конкретном окружении. При этом городская застройка и природный фон слагаются в единую зрительную картину.

Древесные насаждения играют исключительно важную роль в обеспечении возможности полноценного загородного отдыха населения. Поэтому в системе зеленых насаждений необходимо выделение территорий, предназначенных для рекреации (преимущественно в лесопарковом поясе пригородных лесов). При этом считается главным и учет транспортной доступности, и возможность создания живописных ландшафтов. Нашими исследованиями установлено, что в переходной от сухостепной к полустепной зоне, где расположена Волгоградская агломерация, не менее важен учет ряда других специфических факторов и показателей, в первую очередь лесорастительных условий, засухо-, соле- и газоустойчивости древесных пород и особенностей их роста в чистых и смешанных насаждениях. В окрестностях Волгограда лесонасаждения с большим участием кустарников зачастую труднопроходимы. На значительных площадях имеет место суховершинность деревьев и усыхание кустарников. Их аттрактивность и, как следствие, рекреационный потенциал крайне низки. В лесонасаждениях преимущественно рекреационного назначения практически полностью отсутствуют элементы инфраструктуры обустроенные видовые площадки, песчано-гравийные и щебенчато-набивные дороги с твердым покрытием, указатели, карты-схемы территории лесонасаждения, площадки для активного отдыха, павильоны для укрытия от дождя, мосты, источники питьевой воды, водоемы (последние есть в Волго-Ахтубинской пойме, но практически без элементов благоустройства).

Кроме того, в течение большей части теплого периода года имеет место высокая пожарная опасность пригородных лесов. Ежегодно принимаются решения органов власти о временном, но, как правило, на длительный срок запрещении посещения рекреантами большей части пригородных лесонасаждений Волгоградского лесничества. Сложившееся положение делает исключительно важным решение проблемы создания действительно аттрактивных, не имеющих высокой пожарной опасности лесопарковых насаждений, соответствующих современным требованиям ландшафтной архитектуры и обеспечивающих возможность полноценного отдыха городского населения.

В массивах реликтовых лесонасаждений (Чапурниковская балка, балка Григорова и др.) для обеспечения устойчивости ландшафта к различным видам воздействия целесообразно выделение заповедных участков. В пригородных насаждениях Волго-Ахтубинской поймы необходимы установка специального режима охраны ландшафта и выделение охранных зон, обеспечивающих нормальный рост и состояние естественной древесной растительности и защиту наиболее ценных участков от чрезмерного воздействия рекреантов.

Особенно актуально для Волгограда как приволжского города и как города сухостепной зоны использование сочетания городских зеленых насаждений с декоративными искусственными и природными водными объектами. В довоенном и послевоенном Сталинграде и Волгограде проектировщики умело сочетали массивы зеленых насаждений и фонтанов на Центральной набережной, на бульваре по пр. Ленина, в сквере на улице Порт-Саида и т. д. Как у нас в стране, так и в ближнем зарубежье достаточно примеров городского благоустройства, при котором используются локальные водные объекты: мини-бассейны, небольшие фонтаны и прочее в сочетании с различными формами озеленения (рис. 3).





Рис. 3. Примеры использования локальных водных объектов в благоустройстве г. Минска и Пензы

По мнению авторов, умелое использование потенциальных возможностей городского рельефа в сочетании с различными видами озеленения и всевозможными формами и типами водных объектов обеспечит проектировщиков Волгограда широкой палитрой средств для преобразования различных неблагоприятных категорий земель городского пространства и формирования комфортной, гармоничной и оригинальной городской среды. Проблема зеленого строительства в Волгоградской агломерации должна решаться архитектурно-строительным сообществом целенаправленно и планомерно, пока все существующие в городе открытые пространства как территории потенциальной рекреации не стали территориями торговых центров и элитной жилой застройки.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Доклад о состоянии окружающей среды Волгоградской области в 2011 году. Волгоград : СМОТРИ, 2012. 352 с.
- 2. Анопин В. Н., Матовникова Н. Г., Матовников С. А. Архитектурно-планировочные и адаптивно-ландшафтные основы зеленого строительства на территории Волгоградской агломерации. Волгоград: ВолгГАСУ, 2012. 159 с.

- 3. Ландсберг Г. Климат города. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 248 с.
- 4. Владимиров В. В., Микулина Е. М., Ягина 3. Н. Город и ландшафт. М. : Мысль, 1986. 238 с.
- 5. *Авдотьин Л. Н., Лежава И. Г., Смоляр И. М.* Градостроительное проектирование. М. : Стройиздат, 1989. 432 с.
  - 6. Сычева А. В. Ландшафтная архитектура: учеб. пособие для вузов. М.: Оникс, 2005. 87 с.
- 7. Иванова Н. В., Соколов И. И., Соколов А. И. Влияние реки на ландшафтную организацию территории города : Материалы ежегодной науч.-прак. конф. профессорско-преподавательского состава и студентов ВолгГАСУ. Ч. 1. Архитектура, градостроительство, строительство. Волгоград, 2008. С. 64—66.
- 1. Doklad o sostoyanii okruzhayushchey sredy Volgogradskoy oblasti v 2011 godu. Volgograd : SMOTRI, 2012.  $352 \mathrm{\ s}$ .
- 2. Anopin V. N., Matovnikova N. G., Matovnikov S. A. Arkhitekturno-planirovochnye i adaptivno-landshaftnye osnovy zelenogo stroitel'stva na territorii Volgogradskoy aglomeratsii. Volgograd: VolgGASU, 2012. 159 s.
  - 3. Landsberg G. Klimat goroda. L.: Gidrometeoizdat, 1983. 248 s.
  - 4. Vladimirov V. V., Mikulina E. M., Yagina Z. N. Gorod i landshaft. M.: Mysl', 1986. 238 s.
- 5. Avdot'in L. N., Lezhava I. G., Smolyar I. M. Gradostroitel'noe proektirovanie. M.: Stroyizdat, 1989 432 s.
  - 6. Sycheva A. V. Landshaftnaya arkhitektura: ucheb. posobie dlya vuzov. M.: Oniks, 2005. 87 s.
- 7. *Ivanova N. V.*, *Sokolov I. I.*, *Sokolov A. I.* Vliyanie reki na landshaftnuyu organizatsiyu territorii goroda: Materialy ezhegodnoy nauch.-prak. konf. professorsko-prepodavatel'skogo sostava i studentov VolgGASU. Ch. 1. Arkhitektura, gradostroitel'stvo, stroitel'stvo. Volgograd, 2008. S. 64—66.

© Матовников С. А., Анопин В. Н., Матовникова Н. Г., 2014

Поступила в редакцию в январе 2014 г.

## Ссылка для цитирования:

*Матовников С. А., Анопин В. Н., Матовникова Н. Г.* Ландшафтно-архитектурные методы в зеленом строительстве Волгоградской агломерации // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 248-257.

УДК 504.052

## Н. В. Коростелева

# К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ВОЛГОГРАДА

Статья посвящена рассмотрению существующих экологических проблем на территории Волгограда. Автор анализирует состояние окружающей среды города и проводимые мероприятия, направленные на обеспечение устойчивого и экологически безопасного развития территории.

Ключевые слова: экологическая безопасность, экологические проблемы, оздоровление окружающей среды.

The article discusses the existing environmental problems in the city of Volgograd. The author analyzes the state of the urban environment and the measures that are carried out to ensure sustainable and environmentally sound development of the territory.

K e y words: environmental safety, environmental problems, environmental sanitation.

Экологическая безопасность — состояние защищенности природной среды и жизненно важных интересов человека от возможного негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, их последствий («Об охране окружающей среды»  $\Phi$ 3 от  $10.01.2002 \ N$ 2  $7-\Phi$ 3).

Глобальные экологические проблемы, связанные с негативными для окружающей среды процессами, возрастанием экологического ущерба от стихийных бедствий и техногенных катастроф, загрязнением атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод, а также морской среды, затрагивают интересы Российской Федерации и ее граждан.

В 40 субъектах Российской Федерации более 54 % городского населения находится под воздействием высокого и очень высокого загрязнения атмосферного воздуха. Объем сточных вод, сбрасываемых в поверхностные водные объекты без очистки или недостаточно очищенных, остается высоким. Практически во всех регионах сохраняется тенденция к ухудшению состояния почв и земель. Интенсивно развиваются процессы, ведущие к потере плодородия сельскохозяйственных угодий и к выводу их из хозяйственного оборота. Опустыниванием в той или иной мере охвачены 27 субъектов Российской Федерации на площади более 100 млн гектаров. Количество отходов, которые не вовлекаются во вторичный хозяйственный оборот, а направляются на размещение, возрастает. При этом условия хранения и захоронения отходов не соответствуют требованиям экологической безопасности (Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года).

Волгоград является одним из городов России с неблагоприятной экологической обстановкой. Это связано прежде всего с наличием в городе большого числа промышленных предприятий и увеличивающейся с каждым годом плотностью автомобильного транспорта.

Атмосферный воздух города имеет высокий уровень загрязнения. Это — острейшая экологическая проблема региона. По оценкам специалистов, основную часть загрязнений приносят автомобильный транспорт и промышленные

предприятия. По объему выбросов наибольший вклад в загрязнение атмосферы Волгограда вносят заводы, работающие в сфере металлургии, топливной, химической и нефтехимической промышленности. Лидером среди городских районов по выбросам загрязняющих веществ является Красноармейский район, где сосредоточено 11 % всех предприятий города [1].

Состояние водных ресурсов нашего региона также оставляет желать лучшего. Реки, пруды и озера Волгограда страдают от сбросов в них сточных вод, недостаточно очищенных или вовсе не прошедших очистку. Источником загрязнения водоемов города являются жилищно-коммунальное хозяйство и промышленные предприятия, причем подавляющая часть сбрасываемых вод приходится на предприятия ЖКХ — до 70 %. Именно объекты ЖКХ сегодня вносят основной вклад в загрязнение двух главных рек области — Волги и Дона. Ежегодно в реки Волго-Донского бассейна сбрасывается более 200 млн кубометров сточных вод [1]. Для улучшения состояния гидросферы города и региона в целом необходимо оперативное выявление и обеззараживание загрязненных водоемов, строительство новых очистных сооружений и реконструкция старых, благоустройство прибрежных зон и т. д.

Наряду с проблемами загрязнения воздуха и водоемов Волгограда остро стоит проблема загрязнения почв. Основными источниками их загрязнения являются выбросы промышленных предприятий и автомобильного транспорта, несанкционированные свалки промышленных и бытовых отходов, а также нерациональное внесение удобрений и средств защиты растений. В почвах Волгограда наблюдается превышение допустимой нормы содержания формальдегидов и фенола. Наиболее сильно загрязнены почвы территорий промышленных предприятий Волгограда [1].

Экология Волгограда испытывает негативное влияние, связанное и с нерациональным, неорганизованным размещением отходов, многие из которых представляют опасность как для общей экологической обстановки города, так и для человека. По состоянию на начало 2011 г. территории области накоплено порядка 50...60 млн т отходов, а их ежегодный прирост составляет до 1,5 млн т [1].

Неотъемлемой частью городского ландшафта являются леса и городские зеленые насаждения. Они выполняют экологические, санитарно-гигиенические, микроклиматические, рекреационные и эстетические функции, жизненно важные для каждого жителя города. Помимо пагубного влияния промышленных и транспортных выбросов, невосполнимые потери «зеленому щиту» наносит также человек: это неорганизованный отдых горожан и незаконная вырубка лесов и насаждений с целью освобождения территории для строительства. На сегодняшний день в черте города насчитывается 1300 га зеленых насаждений, 80 % из которых — довольно старые посадки [1].

Устойчивое развитие Волгограда предполагает обеспечение существенного прогресса в развитии основных секторов экономики, повышение инвестиционной привлекательности города, повышение уровня жизни и условий проживания населения, достижение долговременной экологической безопасности Волгограда и смежных территорий, рациональное использование всех видов ресурсов, современные методы организации транспортных и инженерных систем, создание городской среды, благоприятной для жизни.

Необходимость обеспечения экологической безопасности при модернизации экономики и в процессе инновационного развития не вызывает сомнений.

Основные задачи государства в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности, а также механизмы их реализации определены утвержденными Президентом Российской Федерации 30 апреля 2012 г. «Основами государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года». Согласно их положениям, стратегической целью государственной политики в области экологического развития является решение социально-экономических задач, обеспечивающих экологически ориентированный рост экономики, сохранение благоприятной окружающей среды, биологического разнообразия и природных ресурсов для удовлетворения потребностей нынешнего и будущих поколений, реализации права каждого человека на благоприятную окружающую среду, укрепления правопорядка в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности.

«Основами» определены механизмы реализации государственной политики в области экологического развития, которые используются при решении задачи формирования эффективной системы управления в области обеспечения экологической безопасности.

Так, например, при решении задачи предотвращения и снижения текущего негативного воздействия на окружающую среду используются следующие механизмы: экологическое нормирование на основе технологических нормативов при условии обеспечения приемлемого риска для окружающей среды и здоровья населения; поэтапное исключение практики установления временных сверхнормативных выбросов и сбросов загрязняющих веществ в окружающую среду; снижение удельных показателей выбросов и сбросов загрязняющих веществ в окружающую среду, образования отходов по видам экономической деятельности до уровня, соответствующего аналогичным показателям, достигнутым в экономически развитых странах; установление обязательности проведения государственной экологической экспертизы проектной документации экологически опасных объектов, включая радиационно, химически и биологически опасные объекты; совершенствование процедуры и методологии оценки воздействия на окружающую среду и ее учет при принятии решений на всех уровнях, в том числе гармонизация процедуры проведения такой оценки в соответствии с международными договорами Российской Федерации и создание нормативно-правовой базы для стратегической экологической оценки; увеличение объема строительства зданий и сооружений, сертифицированных в системе добровольной экологической сертификации объектов недвижимости с учетом международного опыта применения «зеленых» стандартов; осуществление мер, предусмотренных Климатической доктриной Российской Федерации и документами, направленными на ее реализацию.

В Волгограде также проводятся мероприятия, направленные на обеспечение устойчивого и экологически безопасного развития территории, создание условий, обеспечивающих снижение антропогенного воздействия на окружающую среду, формирование комфортных условий проживания населения города.

Экология Волгограда требует оперативного внедрения новых идей, программ, предложений, направленных на улучшение экологической ситуации в городе. В регионе есть понимание существующей проблемы и принимаются реальные меры для ее решения. В частности, разработана и успешно реализуется

долгосрочная целевая программа «Охрана окружающей среды и рациональное природопользование на территории Волгоградской области» на 2010—2013 гг. Также стартовала долгосрочная муниципальная целевая программа «Чистый Волгоград» на 2012—2018 гг. С 1 января 2013 г. начала действовать ведомственная целевая программа «Повышение экологической безопасности Волгоградской области на 2013—2015 гг.». В рамках этих программ проводится целый комплекс природоохранных мероприятий, осуществляется модернизация и техническое перевооружение экологически вредных производств, решаются вопросы очистки выбросов, сбросов и утилизации отходов, проводятся работы по благоустройству и озеленению санитарно-защитных зон.

Считаем, что реализация всех принятых программ обеспечит благоприятные социально-экономические и экологические предпосылки для оздоровления окружающей среды Волгограда и достижение основной стратегической цели — улучшение качества окружающей среды, повышение экологической безопасности города, повышение качества жизни населения. Осуществление программных мероприятий позволит своевременно проводить оценку состояния окружающей среды на территории города, выявлять негативные процессы, прогнозировать их развитие и реализовывать природоохранные мероприятия, направленные на снижение экологического ущерба.

Но для решения конкретных задач, направленных на оздоровление экологической ситуации, необходимо иметь достоверную информацию об изменении состояния окружающей среды и факторах, оказывающих на экологию серьезное влияние. Поэтому в Волгоградской области утверждена концепция развития территориальной системы наблюдения за состоянием воздуха в регионе до 2015 г. Данная система позволит получать оперативную информацию о состоянии атмосферного воздуха, о превышении предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ. Данная информация впоследствии будет использоваться при разработке целевых программ и мероприятий в сфере охраны воздуха. Сейчас в регионе работают 15 стационарных постов, которые наблюдают за состоянием атмосферы города и области. 8 из них находятся в Волгограде, 5 — в Волжском, 1 — в Светлоярском районе и 1 — в Краснослободске. Кроме этого, в регионе работают специальные передвижные лаборатории, исследующие загазованность воздуха. К сожалению, данная система не включает наблюдения за шумовым загрязнением окружающей среды.

Об актуальности проблемы контроля уровня шума в Волгограде свидетельствуют такие цифры, как нахождение 70 % территории города в зоне шумового дискомфорта при наблюдаемой величине превышений допустимого уровня шума на отдельных территориях города и в квартирах жилых домов в среднем 10—20 дБА [2].

В связи с объективным развитием города, ростом объемов и темпов строительства, развитием транспортного комплекса будут появляться новые источники шума, а шумовые характеристики существующих источников шума возрастать. Это относится в первую очередь к основному источнику шума в Волгограде — автотранспортным потокам.

В городе существует потребность в системно проводимых исследованиях уровней шума, которые послужат базой для методических разработок и практических решений, реализуемых на разных уровнях территориальной иерархии города.

Единственным способом получения таких данных являются работы по картированию (составление карт изолиний разного уровня звука от совокупности источников). Результаты картирования уровня шума позволяют обосновать необходимость и приоритетность шумозащитных мероприятий, определять их эффективность, а также они необходимы для информирования жителей об условиях проживания. Шумовые карты целесообразно регулярно обновлять с учетом выполняемых в городе шумозащитных мероприятий. Так, например, в странах Евросоюза периодичность обновления карт транспортного шума, законодательно закрепленная директивными документами, должна быть не менее одного раза в пять лет. Согласно европейскому законодательству, карты шума должны быть составлены для всех:

населенных пунктов с населением более 100 тыс. жителей; автомагистралей с движением более 3 млн автомобилей в год; железных дорог с движением более 30 тыс. поездов в год; аэропортов с движением более 50 тыс. операций в год.

Шумовая карта города, являющаяся частью общего экологического мониторинга, может быть использована властями для решения следующих задач:

разработки реально достижимых норм допустимого шума для конкретного участка;

проектирования и осуществления технических и иных средств по выполнению этих норм;

применения санкций к тем, кто эти нормы не выполняет.

Несмотря на остроту проблемы в городе, принимаются не все возможные меры, позволяющие сдержать рост шумовой нагрузки и снизить сверхнормативный шум.

На сегодняшний день борьба с шумом в городах России должна соответствовать требованиям ГОСТ Р 53187—2008 «Акустика. Шумовой мониторинг городских территорий» и требованиям свода правил СП 51.13330.2011 «Защита от шума».

Практика обязательного выполнения шумозащитных мероприятий существует только во вновь проектируемых микрорайонах или для отдельных объектов строительства: меры по защите от шума должны быть предусмотрены проектными решениями, проходящими государственную экологическую экспертизу. Однако и для данных типов территорий сложившаяся практика несовершенна. Проектной документацией предусматриваются меры в объеме, исключающем дополнительный вклад вновь проектируемых объектов в уже существующий на территории сверхнормативный шум. Кроме того, дальнейший контроль за правильностью заложенных проектных решений и соответствием им реализованного проекта (в части шума) практически не осуществляется: в законодательстве отсутствуют специальные требования о подтверждении правильности проектных решений натурными замерами после ввода объекта в эксплуатацию и выхода его на полный режим работы.

В районах сложившейся застройки шумозащитные мероприятия практически не осуществляются (ни на территории, ни в квартирах жилых домов). Это связано как с высокой затратностью мероприятий, так и техническими трудностями применения строительно-акустических и градостроительных мер регулирования уровня шума в условиях плотной застройки.

«Кодексом Волгоградской области "Об административной ответственности"» предусмотрена ответственность за действия, которые могут нарушить покой граждан в ночное время суток, в том числе за использование звуковой охранной сигнализации автомашин, производство ремонтных, строительных и строительно-погрузочных работ, использование пиротехнических средств и иные действия. Однако практика применения норм закона незначительна, что объясняется сложной процедурой установления виновного (статья 4.19). На федеральном уровне специального законодательства по вопросам регулирования уровня шума нет.

В этих условиях для сохранения акустически благополучных территорий города, недопущения ухудшения качества среды обитания по фактору шума, снижения сверхнормативного шума необходимо масштабное внедрение шумопонижающих технологий во всех сферах городского хозяйства и промышленности, разработка специальных мер по снижению уровня шума, ужесточение мер ответственности за нарушения, связанные с созданием сверхнормативного шума, при упрощении процедур привлечения к ответственности.

Основными направлениями деятельности по снижению шумового воздействия от автотранспорта, по нашему мнению, должны стать:

разработка мероприятий, имеющих шумопонижающий эффект, при разработке городских программ и схем развития транспортных систем города, а также при разработке целевых городских программ, в которых затрагиваются вопросы, связанные с изменением шумового режима;

внедрение применения шумопонижающего дорожного покрытия при проведении строительства, реконструкции и капитального ремонта дорог в городе;

разработка системы ограничительных мер в части движения в ночное время по территории спальных районов города Волгограда отдельных видов транспортных средств (например, мотоциклов и большегрузного транспорта);

внедрение системы контроля соблюдения требований к внешнему уровню шума автомобилей при прохождении государственного технического осмотра транспортных средств.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Доклад «О состоянии окружающей среды Волгоградской области в 2011 году». Волгоград : СМОТРИ, 2012. 352 с.
- 2. *Коростелева Н. В.* Оценка шумового режима примагистральных территорий города Волгограда и разработка рекомендаций по созданию оптимальных условий проживания // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер. : Стр-во и архит. 2011. Вып. 23(42). С. 240—243.
- 1. Doklad «O sostoyanii okruzhayushchey sredy Volgogradskoy oblasti v 2011 godu». Volgograd : SMOTRI, 2012. 352 s.
- 2. *Korosteleva N. V.* Otsenka shumovogo rezhima primagistral'nykh territoriy goroda Volgograda i razrabotka rekomendatsiy po sozdaniyu optimal'nykh usloviy prozhivaniya // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2011. Vyp. 23(42). S. 240—243.

© Коростелева Н. В., 2014

Поступила в редакцию в январе 2014 г.

Ссылка для цитирования:

*Короствева Н. В.* К вопросу обеспечения экологической безопасности на территории Волгограда // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 258—263.

УДК 72:796.5(470.45)

## И. И. Соколов, Д. Р. Муслимова, А. И. Соколов, Е. И. Горюнова, Е. И. Мельникова

# ВОЗМОЖНОСТИ РЕКРЕАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Выявлена проблема оценки территорий Волгоградской области для рекреационного использования. Рассмотрена региональная особенность развития рекреационного использования, а также предлагаются модели сохранения и восстановления ландшафтного разнообразия на территории области.

К л ю ч е в ы е  $\,$  с л о в а: природно-территориальные комплексы, рекреационные ресурсы, виды ландшафтов.

The problem of estimation of the territories in Volgograd Oblast for the recreational use is defined. The regional peculiarity of the development of recreational activity is considered, and the model of maintenance and renewal of landscape variety on the territory of Volgograd Oblast are offered.

K e y w o r d s: natural are territorial complexes, recreational resources, types of landscapes.

Рекреация имеет не только социальное, но и огромное экономическое значение. Для усовершенствования действующего механизма развития рекреационного комплекса необходимо реализовать ряд мероприятий, которые бы способствовали созданию рекреационной деятельности, основанной на использовании рекреационных ресурсов. К ресурсам рекреации относятся:

природные комплексы и их компоненты (рельеф, животный мир, климат, растительность, различные водоемы);

природные объекты (пещеры, водопады, красивые ландшафты);

культурные памятники, города и населенные пункты, уникальные технические сооружения.

Понятие рекреации можно рассматривать только в контексте с человеком. Рекреация всегда несла определенное социокультурное содержание. Есть несколько подходов к оценке, общим для них является то, что все они обращены на изучение факторов (ресурсов и условий) рекреационной деятельности. Как правило, оценке подвергаются рельеф, климат, водоемы и водотоки, растительность (древесная растительность обособленно), транспортная доступность, наличие рекреационной инфраструктуры (зданий, комплексов, инженерных систем).

Туристические возможности Волгограда и Волгоградской области разнообразны: от санаторно-курортного до экстремального отдыха [1]. При анализе природных условий России оценке подвергаются: климат, лесная растительность, водоемы, рельеф, условия познавательного отдыха. К факторам, подвергаемым оценке при определении рекреационных свойств территории, некоторые исследователи дополнительно относят традиции рекреационного использования территории, образ жизни населения, а для районов со снежной зимой и для горных территорий также высоту снежного покрова (в момент максимального снегонакопления), высоту над уровнем моря, степень лавинной опасности.

На территории Волгоградской области выделяются восемь природнотерриториальных комплексов (ПТК) (рис. 1) и несколько ландшафтов речных долин: 1) Калачский возвышенный; 2) Хоперско-Бузулукский равнинный; 3) Приволжский возвышенный; 4) Восточно-Донской возвышенный; 5) Нижне-Донской равнинный; 6) Заволжский равнинно-возвышенный (Сыртовый); 7) Ергенинский возвышенный; 8) Прикаспийский низменный; 9) Волго-Ахтубинский [2]. Природно-территориальные комплексы являются итогом развития природной среды и выделяются как естественно ограниченные друг от друга ландшафты. В каждом из них взаимосвязи между компонентами природы различны. Границы ландшафтов в одних случаях орографические или же водные, а на равнинах — биоклиматические (рис. 1) [3].

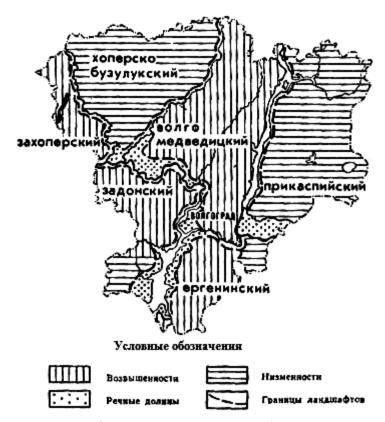


Рис. 1. Ландшафтная схема Волгоградской области

На территории Волгоградской области располагаются уникальные природные достопримечательности: Волго-Ахтубинская пойма, семь природных парков, озеро Эльтон, пещеры Уракова бугра и др. [4].

Волго-Ахтубинский ландшафт располагается между Волгой и Ахтубой, ширина около 30 км. Пойма в пределах Волгоградской области составляет 60 км. Рельеф этой территории образовался под действием рек Волги и Ахтубы [5]. Эта местность затапливается в период половодья, следовательно, формируется почвенно-растительный покров.

Пустынный ландшафт Прикаспийской низменности ярко выделяет Волго-Ахтубинскую пойму, делая ее оазисом, где растет луговая растительность, вдоль рек — пойменные леса (тополь, ветла, кустарники). Повышенные участки покрыты степной растительностью. Волго-Ахтубинская пойма расположена в бассейне реки Волги на территории Среднеахтубинского, Ленинского

и Светлоярского районов Волгоградской области. С одной стороны Волго-Ахтубинскую пойму ограничивает река Волга, с другой — Ахтуба. Полосой шириной в несколько десятков километров тянется пойма, окруженная со всех сторон бескрайними степями. Ежегодно здесь наблюдается сильное половодье. Климат в Волго-Ахтубинской пойме достаточно мягкий, влажный, более ровный, чем в степи, с меньшими колебаниями температур [6].

Волго-Ахтубинская пойма интенсивно используется сельскохозяйственным производством. Огромные территории заняты плантациями для выращивания помидоров, огурцов, капусты и других огородных культур. Множество садов.

Немалое значение имеет Волго-Ахтубинская пойма как зона рекреации. Также это природный комплекс, имеющий особую экологическую, эстетическую ценность, предназначенный для использования в различных целях. Здесь расположены дачи, спортивно-оздоровительные и туристские базы (рис. 2).

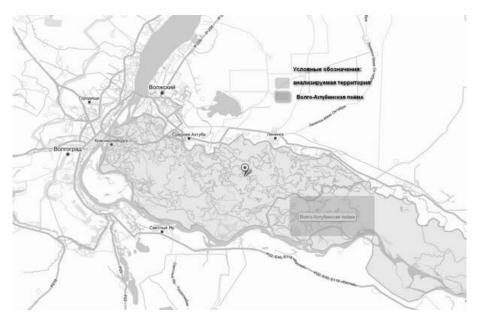


Рис. 2. Схема Волго-Ахтубинской поймы

Рекреационные ресурсы способствует образованию и развитию рекреационных районов, определяют специализации этих районов. Развитость рекреационной деятельности в каждом районе различна, зависит от нескольких факторов:

климатических условий;

наличия водных акваторий, природно-рекреационного и природно-эстетического ресурса;

наличия лечебных грязей и минеральных источников;

эстетических качеств;

экологического состояния окружающей природной среды.

Плохое состояние ландшафтов свидетельствует о необходимости принятия мер по их сохранению и восстановлению, причем их реабилитация и развитие должны осуществляться с учетом устоявшихся традиций природопользования и особенностей региона.

Успешность рекреационной деятельности природных объектов во многом зависит от усовершенствования контроля за состоянием природной среды, отсутствия загрязнения окружающей среды стоками в водоемы и выбросами в атмосферу от рекреационных учреждений, скоплений мусора вокруг временных палаточных лагерей и т. д. Также рекреационные территории должны быть защищены от загрязнения их различными предприятиями и отдыхающими. Сохранение природы начинается с бережного отношения к природному пейзажу. Восстановление ландшафтного разнообразия должно стать идеологией XXI века.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Антнофеев А. В.* Агломеративное развитие городов: архитектурно-градостроительные идеи и их реализация (на примере Волгограда) // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2009. Вып. 15(34). С. 179—183.
- 2. Птичикова Г. С. Архитектура и потребитель: метаморфозы города под влиянием глобального туризма // Социология города. 2010. № 3. С. 10—15.
- 3. Дюжев С. А., Соколов И. И. Система как механизм воплощения топоформ действительности расселения // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2008. Вып. 1(5). С. 2.
- 4. *Соколов И. И., Соколов А. И.* Система рекреационных территорий основа экосистемы города // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2009. Вып. 15(34). С. 234—239.
- 5. *Птичникова Г. А., Антюфеева О. А.* Спрятавшиеся памятники (о малоизвестных объектах культурного наследия послевоенного Сталинграда) // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2009. Вып. 2(9). С. 2.
- 6. Оценка рекреации потенциала Волгоградской области / И. И. Соколов, Г. В. Павлов, А. И. Соколов, Е. И. Горюнова, И. И. Соколов // Вестник Волгогр. гос. архит-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2012. Вып. 28 (47). С. 343—349.
- 1. *Antyufeev A. V.* Aglomerativnoe razvitie gorodov: arkhitekturno-gradostroitel'nye idei i ikh realizatsiya (na primere Volgograda) // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2009. Vyp. 15(34). S. 179—183.
- 2. *Ptichikova G. S.* Arkhitektura i potrebitel': metamorfozy goroda pod vliyaniem global'nogo turizma // Sotsiologiya goroda. 2010. N2 3. S. 10—15.
- 3. *Dyuzhev S. A., Sokolov I. I.* Sistema kak mekhanizm voploshcheniya topoform deystvitel'nosti rasseleniya // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2008. Vyp. 1(5). S. 2.
- 4. *Sokolov I. I.*, *Sokolov A. I.* Sistema rekreatsionnykh territoriy osnova ekosistemy goroda // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2009. Vyp. 15(34). S. 234—239.
- 5. Ptichnikova G. A., Antyufeeva O. A. Spryatavshiesya pamyatniki (o maloizvestnykh ob"ektakh kul'turnogo naslediya poslevoennogo Stalingrada) // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2009. Vyp. 2(9). S. 2.
- 6. Otsenka rekreatsii potentsiala Volgogradskoy oblasti / I. I. Sokolov, G. V. Pavlov, A. I. Sokolov, E. I. Goryunova, I. I. Sokolov // Vestnik Volgogr. gos. arkhit-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2012. Vyp. 28 (47). S. 343—349.
  - © Соколов И. И., Муслимова Д. Р., Соколов А. И., Горюнова Е. И., Мельникова Е. И., 2014

Поступила в редакцию в феврале 2014 г.

## Ссылка для цитирования:

Возможности рекреационной деятельности на территории Волгоградской области / И. И. Соколов, Д. Р. Муслимова, А. И. Соколов, Е. И. Горюнова, Е. И. Мельникова // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 264—267.

## ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. ТЕОРИЯ РАЗВИТИЯ ГОРОДА

УДК 711.4(470.45)

В. И. Атопов

# БОЛЬШОЙ ВОЛГОГРАД — НОВЫЙ СТРАТЕГИЧЕСКИЙ ВЫБОР В ИСТОРИЧЕСКОЙ МИССИИ СТАЛИНГРАДА

Только имея ясную перспективу будущего, мы можем правильно направлять нашу работу в настоящем. Академик П. Л. Капица, физик

Рефлекс цели есть основная форма жизненной энергии каждого из нас. Академик И. П. Павлов, физиолог

Обосновывается необходимость нового стратегического выбора Волгограда на долгосрочную перспективу XXI в. Такая постановка вопроса диктуется прорывными достижениями науки и важностью предстоящих решений по основным вопросам развития города. В качестве ключевой идеи нового выбора предполагается разработанная учеными ВолгГАСУ концепция «Большого Волгограда». Целевая задача концепции — создание единой синергетически организованной градостроительно-экологической системы Волгоградской агломерации, расположенной на уникальной территории, охватывающей междуречья Волги, Ахтубы и Дона. Будущий Большой Волгоград — это сложная система эффективного взаимодействия многих сфер деятельности, включающая в себя транспортно-логистические узлы международного значения, новую модель организации производства, проекта технологического прорыва в развитии инфраструктуры и городского хозяйства. Суть методологии нового стратегического выбора и неотложная задача дня — задействовать новые факторы развития, способные решать проблемы сегодня и работать на перспективу, достойную исторической миссии Сталинграда.

Ключевые слова: стратегический выбор, Большой Волгоград, новые факторы развития.

The necessity of a new strategic choice of Volgograd for a long-term prospect of the XXI century is justified. Such statement of a question is dictated by breakthrough achievements of science and the importance of the forthcoming decisions on fundamental issues concerning the development of the city. The concept of "Big Volgograd" developed by the scientists from VSUACE is supposed as the main idea of the new choice. The target task of the concept is the creation of a single synergetic organized town-planning and ecological system of the Volgograd agglomeration located on the unique territory, that occupies interfluve of the Volga, the Akhtuba and the Don. Future Big Volgograd represents a difficult system of effective interaction of many fields of activity, including transport and logistic unit of the international value, a new model of the industrial organization, the project of technological break in the development of the infrastructure and municipal services. The essence of the methodology of the new strategic choice and the task is to involve new factors of development, which will help to solve the problems today and to work for prospect worthy the historical mission of Stalingrad.

Key words: strategic choice, Big Volgograd, new factors of development.

В XX в. сформировалась историческая миссия Сталинграда — ответственная позиция лидера в крутых поворотах отечественной истории [1, 2]. Методология этой миссии заключается в двух определяющих требованиях: наличие сильной стратегической идеи, решающей масштабную целевую задачу, и организация всеобщего участия как главного ресурса победы. Эти два исходных требования синергетически связаны и во взаимодействии усиливают друг друга. В соответствии с учением И. П. Павлова идея как целевая задача способна вызывать рефлекс цели и пробуждать живую энергию каждого, а в итоге и массовую инициативу большого гражданского сообщества. Рефлекс цели — это сильный механизм реализации человеческого потенциала.

Такое заключение — не только теоретическое рассуждение о формуле успеха при решении больших задач в крупных проектах. Главное — это теперь уже историческая практика и поучительное наследие Сталинградской миссии.

Эта миссия Сталинграда проявилась в 1930-е гг., когда с организацией строительства Сталинградского тракторного завода начала работать целевая идея программной индустриализации всей страны. В Сталинграде эта работа приобрела форму широкой интеллектуальной мобилизации, массовой инициативы и системного кластерного подхода к созданию крупного машиностроительного комплекса производств полного технологического цикла. Важнейшую роль в этой работе сыграла созданная система образования и многоуровневой профессиональной подготовки кадров. Стратегический успех был обеспечен всеобщим участием людей, увидевших возможность личной самореализации и перспективу всеобщего дела — создание завода, развитие города, успех экономического прорыва страны. Это и сегодня весьма поучительный опыт для инновационного преобразования индустриальной базы города.

В годы Великой Отечественной войны победа в Сталинградской битве явилась результатом не только беспримерного массового героизма солдат и офицеров, но и гениальной идеи стратегического прорыва, масштаб которого изменил весь ход Второй мировой войны и судьбу Европы. В послевоенные годы в наших личных встречах в Волгограде легендарные сталинградские полководцы В. И. Чуйков и А. И. Родимцев не раз приводили примеры, когда военный успех фронтовых операций являлся результатом единства стратегического замысла и тактического мастерства, боевого опыта наших солдат.

В первые послевоенные годы историческая миссия Сталинграда продолжала победное шествие выдающимися идеями и массовым инженерным творчеством при строительстве Волго-Донского судоходного канала, Волжской гидроэлектростанции, восстановлении и строительстве нового Сталинграда, а в дальнейшем миссия продолжалась промышленно-строительным бумом Волгограда в 1970-е гг. В городе развивалось машиностроение, производство оборонной и электронной техники, создавалась новая база высшей школы, научных и проектных институтов, началось строительство крупнейших инфраструктурных объектов города.

Неудачи перестройки в СССР и последующего периода переходной экономики уже в России имеют общую методологическую причину [3]. Она заключается в отсутствии целевой идеи, фундаментальной концепции, определяющей идеальный прообраз будущей социально-экономической системы

страны, и в неразработанности прообраза будущего Волгограда как воплощения национальной стратегии в региональном масштабе. А это очень символический и значимый прообраз великого города мировой истории. Может быть, это первопричина того, что не работает Павловский рефлекс цели, не срабатывает интеллектуальная мобилизация всего человеческого потенциала. Отсутствие общей объединяющей цели и равных стартовых возможностей для каждого человека — может быть, в этом первопричина и критически опасного социального расслоения общества. Каждый начал искать свою цель — праведную и неправедную — в турбулентных событиях переходного периода.

Опыт учит: российскому народу, волгоградскому гражданскому сообществу сегодня нужно предложить такую цель, такую идею, которая разбудит его жизненный интерес и инициативу и, главное, будет выше и сильнее примитивного инстинкта стяжательства и личного обогащения.

Президент РФ В. В. Путин в Послании Федеральному собранию 12 декабря 2013 г. заявил о нашей общенациональной задаче — *Россия должна стремиться быть лидером современного мира*. И это не только декларация о намерениях. Это задача интеллектуальной мобилизации и программных практических действий для каждого города и региона страны. Это задача их стратегической перспективы, но, вместе с тем, это и неотложное задание на сегодня — обеспечить социально-экономическую устойчивость и конкурентную состоятельность в тревожном мире перманентных кризисов и военных угроз.

Волгоград в его современном экономическом состоянии и на фоне прогнозируемой общемировой перспективы научно-технических прорывов тоже обязан задуматься о своем новом стратегическом выборе. Время написания рутинных псевдонаучных стратегий, как и время аварийного реагирования на непрерывные критические ситуации в городе, закончилось. Городу и его агломерации нужны новые созидательные идеи и крупные проекты, решающие тупиковые проблемы дальнейшего развития градостроительной системы, прорыва на новый уровень технологического развития индустриальной базы, опережающего развития производственной и социальной инфраструктуры.

Для Волгограда задача идти в ногу с Россией требует изменения логики и масштаба мышления. На будущее Волгограда мы должны посмотреть в новой системе координат.

Более десяти лет назад ученые Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета выдвинули идею нового стратегического выбора Волгограда на перспективу XXI в. [4]. На стадии разработки концепции проекта эта идея получила название «Большой Волгоград». В процессе дальнейшей разработки концепция была опубликована в ряде научных изданий, обсуждалась на многих научных, в том числе международных, конференциях, получила общественное признание.

За прошедший период разработка ряда научных проблем в рамках этой концепции и новых задач стратегического развития Волгограда значительно продвинулась вперед. В то же время реальные процессы жизнедеятельности и развития Волгограда как целостной градостроительной, производственнотехнологической и социально-экономической системы серьезно усложнились и обострились.

Актуальность задачи нового стратегического выбора и концепции проекта «Большой Волгоград» резко возросла. Она возросла не только в силу объективной необходимости обеспечить устойчивость и перспективу развития города, но и необходимости нового этапа развития исторической миссии Сталинграда как пилотного проекта градостроительной практики новой России.

Приведенные выше идеи развития города важны не только с точки зрения решения конкретных задач. Они определяют новый горизонт мышления, требуют перехода на иной масштаб проектных решений, которые сегодня поставлены в повестку дня достижениями науки и темпами развития конкурентного мира. Время инерционного развития и формального исполнения бюрократических обязанностей действительно осталось в прошлом. Сегодня для Волгограда это тупиковый путь. В. В. Путин в Послании Федеральному собранию 12 декабря 2013 г. предельно точно определил ключевую задачу: «В полную силу задействовать новые факторы развития». Но новые факторы, как и новые идеи, не витают в воздухе, они рождаются в труде, в творческом поиске. Надо провести инвентаризацию всех институтов развития, оценку уровня технологического состояния всех градообразующих производственных предприятий, отстроить современную систему технологического и экологического регулирования, формировать спрос на высокие технологии, установить в работе вектор на технологический прорыв, повысить на порядок вклад добавленной стоимости от оборота интеллектуальной собственности, в полной мере реализовать конкурентные преимущества Волгоградского региона.

«Большой Волгоград» — это, конечно, стратегический прорыв [5], но отнюдь не к голубой мечте сторонников потребительского общества и спекулятивной экономики. В основе концепции будущего города — новая индустриализация и приоритет реальной экономики, только теперь уже на основе новой модели организации производства и новых наукоемких прорывных критических технологий. И это не только требование мирового конкурентного рынка. Сегодня уже просто невозможно обеспечить устойчивость социально-экономической системы Волгограда с существующим депрессивным производством и устаревшим наследством производственной и инфраструктурной базы города. Надо очистить экономику города от устаревших неэффективных и вредных технологий.

В начале нового века президент Путин верно оценил исходную ситуацию России: «Нам досталось великое, но устаревшее наследство». Эта оценка задает стратегическое направление и сегодня для Большого Волгограда. Это должен быть конкурентоспособный город с высокой интеллектуализацией труда и продвинутой реальной экономикой — базовым условием высокого качества жизни. По этому поводу академик Н. Н. Семенов высказал очень мудрую мысль: «Современная наука и техника открывают все новые и великие перспективы для того, чтобы полностью материально обеспечить всех людей в меру их разумных потребностей». В этой мысли ученого ключевые слова — «обеспечить всех людей» и «в меру их разумных потребностей». В этих словах — идея для целой программы практических действий, решающих острую проблему критического социального расслоения общества!

Сегодня задача нового стратегического выбора — создать идеальный прообраз будущего Волгограда в пространственно-временной системе координат, охватывающий фундаментальные проблемы развития градостроительно-экологической системы города, задачи новой организации инновационного

производства и формирования в системе Волгоградской агломерации и Нижней Волги уникального национального парка России «Волго-Ахтубинская пойма». Будущий мегаполис Большой Волгоград по замыслу должен стать мощным международным транспортно-логистическим узлом и связующим центром Евразийского континента, использующим современные скоростные виды сухопутного, водного и воздушного транспорта. В этом направлении важнейшее значение имеет задача строительства в Волгограде нового судоходного канала «Волго-Дон-2» как ключевого звена единого Европейского водного пути.

Проект нового канала должен соответствовать не только современным достижениям науки и требованиям флота, но и задачам перспективного использования этой внутренней транспортной артерии для развития международных связей и обеспечения стратегической безопасности страны.

Концепция Большого Волгограда — это мегапроект такого масштаба и таких прогнозируемых результатов, что он действительно выдвигает Россию на позиции лидера, прежде всего в направлении реализации человеческого потенциала в созидательной деятельности. У Волгограда исключительные конкурентные преимущества: это город мировой истории, расположенный в уникальной природно-географической зоне Волго-Ахтубинской поймы, в самом узком, восьмидесятикилометровом междуречье Волги и Дона, в центре Евразийского континента, являющийся портом пяти морей, обладающий огромными территориальными ресурсами, находящийся в зоне высокого потенциала солнечной и ветровой энергии для развития альтернативной энергетики, в системе больших, малых рек и водоемов для развития масштабного воспроизводства биологических ресурсов. Эти конкурентные преимущества — источник новых идей и новых факторов развития.

У Волгограда и его гражданского сообщества — вековой опыт осуществления проектов стратегического масштаба и исторического значения. Это надежные основания для начала работы над синергетическим проектом века — соединение уникальной природной среды и создание новой модели наукоемкого производства — конкурентоспособного и экологически безопасного.

Предлагаемая концепция развития Волгограда находится в русле идеи исторической перспективы совместного развития, экономического взаимодействия и сплочения стран и народов Евразийского континента от Атлантики до Владивостока, высказанной В. В. Путиным в апреле 2014 г. на его очередной встрече с общественностью России. Большой Волгоград может и должен продолжить свою историческую миссию в XXI в. и выйти на ведущую роль в новой России как будущего лидера современного мира.

Принципиальной особенностью предлагаемой концепции Большого Волгограда является то, что разработка целостного проекта и его реализация во времени и пространстве требуют ряда междисциплинарных исследований и поиска новых факторов развития, поэтому необходимо участие широкого круга профессиональных специалистов — генераторов идей, а также талантливых организаторов на всех уровнях власти города и региона. Условием успеха этого проекта является смелость научной мысли и инициативное участие гражданского сообщества.

Условие широкого гражданского участия — категорическое требование, потому что замысел мегапроекта «Большой Волгоград» предполагает выведение города на уровень «нового урбанизма», то есть формирование такой

современной среды жизни, которая характеризуется не столько промышленно-технологическими требованиями, сколько дружественным отношением к человеку.

Процесс создания и развития Большого Волгограда требует долгосрочного и поэтапного конструктивного прогнозирования. Больше того, он должен быть в системной связи со стратегией развития России и с ее международными экологическими и инфраструктурными договорами и проектами.

Развитие Большого Волгограда должно осуществляться с обязательным научным сопровождением на каждом временном этапе и с независимым градостроительно-экологическим контролем на всем пространстве проекта. Процесс развития должен происходить путем системной реконструкции городской среды Волгограда и его окрестностей. Он предполагает создание совместной транспортной и инженерной инфраструктуры, формирование единой культурной, промышленной, рекреационной и образовательной среды.

Сложной задачей, но обязательным условием реализации проекта является необходимость синхронизации его целевых задач и обеспечения стандартных требований ко всем процессам текущей жизнедеятельности города и его жителей. Опыт решения таких задач у Волгограда уже имеется, например при строительстве крупных подземных объектов скоростного трамвая. Эти задачи решаются методами конструктивного прогнозирования и программированием совмещенных во времени нескольких технологических процессов в условиях напряженной жизни работающего города.

Таких сложных задач будет много. Но от их решения нельзя уходить, иначе лавина текущих забот и аварий будет только нарастать. Мы видим это на собственном опыте. Волгоградцы ждут большой работы и решения целевых задач, и поэтому мы делаем ставку на тех, кто способен смотреть в будущее, прежде всего на молодежь — архитекторов, градостроителей, инженеров, организаторов производства. Мы предлагаем молодому поколению великую цель — построить Большой Волгоград. И надеемся, что сработает рефлекс цели. Потому что великая цель рождает великую энергию.

Выдвинутые здесь идеи и новое видение стратегического выбора Волгограда являются лишь презентацией большой работы, выполненной учеными в многолетнем деловом сотрудничестве со специалистами реального производства, градостроительства и высшей школы.

Развернутая концепция прообраза будущего Большого Волгограда и результаты научных разработок, связанных с этим проектом, будут представлены творческим коллективом ученых Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета в монографии «Большой Волгоград — стратегический прорыв России XXI века». Монография подготовлена к изданию в 2014 г.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Атопов В. И., Масляев В. Е., Липявкин А. Ф. Волгоград. М. : Стройиздат, 1985. 216 с.
- 2. Атопов В. И., Падерин И. Г., Чуйков В. И. Волгоград. М.: Советская Россия, 1985. 238 с.
- 3. *Атолов В. И.* Проблемы устойчивого развития Волгограда. Доклад конгрессу городовпобратимов Финляндии и России. Финляндия, 2009. 23 с.
- 4. Волгоград: в новый век с новой стратегией / В. И. Атопов, А. В. Антюфеев, В. И. Галушкин, В. Н. Кабанов. Волгоград: ВолгГАСА, 2001. 192 с.
- 5. Россия: стратегия прорыва. Синергетические идеи развития / В. И. Атопов, А. В. Антюфеев, Н. М. Галиярова, В. Н. Кабанов. Волгоград : ВолгГАСА, 2003. 515 с.

- 1. Atopov V. I., Maslyaev V. E., Lipyavkin A. F. Volgograd. M.: Stroyizdat, 1985. 216 s.
- 2. Atopov V. I., Paderin I. G., Chuykov V. I. Volgograd. M.: Sovetskaya Rossiya, 1985. 238 s.
- 3. Atopov V. I. Problemy ustoychivogo razvitiya Volgograda. Doklad kongressu gorodovpobratimov Finlyandii i Rossii. Finlyandiya, 2009. 23 s.
- 4. Volgograd: v novyy vek s novoy strategiey / V. I. Atopov, A. V. Antyufeev, V. I. Galushkin, V. N. Kabanov. Volgograd: VolgGASA, 2001. 192 s.
- 5. Rossiya: strategiya proryva. Sinergeticheskie idei razvitiya / V. I. Atopov, A. V. Antyufeev, N. M. Galiyarova, V. N. Kabanov. Volgograd : VolgGASA, 2003. 515 s.

© Атопов В. И., 2014

Поступила в редакцию в мае 2014 г.

## Ссылка для цитирования:

Атопов В. И. Большой Волгоград — новый стратегический выбор в исторической миссии Сталинграда // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 268—274.

УДК 728

## Э. Э. Красильникова, В. А. Русанов, Л. А. Кузина

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ФОРМИРОВАНИЯ ГИБКИХ И УСТОЙЧИВЫХ ЖИЛЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Рассматриваются актуальные архитектурно-планировочные и градостроительные проблемы формирования современных моделей гибких и устойчивых жилых образований. Раскрывается понятие гибкого жилого образования (ГЖО) как устойчивой градостроительной и архитектурно-планировочной модели для развития планировочной структуры города в современных условиях комплексной реконструкции.

К л ю ч е в ы е с л о в а: гибкие и устойчивые жилые образования, устойчивая городская среда, трансформации городского жилья.

The article discusses the current architectural and urban-planning problems of formation of modern models of flexible and sustainable residential structures. The authors define the concept of flexible residential formation as a sustainable urban-planning and architectural design model for the development of the planning structure of the city under modern conditions of complex reconstruction.

K e y w o r d s: flexible and sustainable residential structures, sustainable urban environment, transformation of urban housing.

Актуальность. Современные направления развития городов в условиях усиления процессов урбанизации, вызванных глобализацией, напрямую зависят от формирования новых моделей трансформации городского жилья (жилых образований). В настоящее время современные модели городского жилья не оказывают влияния на дальнейшее развитие градостроительной структуры города и из-за своей традиционной статичности тормозят развитие прилегающих территорий. Это парадоксальная ситуация, так как формирование современного жилья (жилого комплекса, жилого квартала, многофункционального жилого дома и т. д.) должно оказывать влияние на развитие прилегающих территорий, потому что любое жилое образование является не только градообразующим элементом в развитии территории, но и важной социально-градостроительной структурой, требующей формирования вокруг нее комфортной городской инфраструктуры.

Какая модель современного жилья будет способствовать формированию устойчивой и комфортной городской жилой среды и являться вектором для развития и трансформации прилегающих территорий в современных условиях регенерации городов?

Ответ на этот вопрос заключается в определении новых подходов для формирования современных жилых образований, базирующихся не только на принципах устойчивости, но также на применении теоретических основ ландшафтного [1] и устойчивого урбанизма [2] и коэволюционном подходе [3].

Современными тенденциями в формировании гибких и устойчивых жилых образований являются:

градостроительная гибкость;

типологическая вариативность;

ландшафтно-градостроительный подход, направленный на активное включение природы в структуру ГЖО;

формирование своеобразия и идентичности архитектурнопространственного образа ГЖО;

формирование социально ориентированной жилой среды;

эффективное ландшафтно-градостроительное зонирование территории ГЖО.

Роль гибких жилых образований в трансформации пространственно-планировочной структуры города. В настоящее время наиболее эффективным современным направлением развития пространственно-планировочной структуры городов является градостроительная трансформация территорий [4], поэтому на основе формирования новых моделей гибких жилых образований и их внедрения в существующую градостроительную ткань мы можем создать комфортную, экологически безопасную, социально ориентированную и идентичную городскую среду.

Почему именно гибкие жилые структуры в настоящее время являются наиболее эффективными и перспективными для градостроительного развития современных городов?

Гибкие жилые образования (ГЖО) — это симбиоз градостроительно гибкой планировочной структуры жилья с широкой вариативностью типологических решений, применением эффективной инженерной инфраструктуры и современных экологически устойчивых технологий в ландшафтной организации прилегающих территорий на основе сохранения их природного потенциала. Гибкость планировочного решения дает возможность для создания идентичного архитектурного пространства путем формирования индивидуальной архитектурной среды жилых образований, характеризующейся своеобразием и эстетикой стилистических решений.

Одним из главных факторов формирования ГЖО является социальноэкономический подход, в основе которого лежит принцип формирования жилых территорий с устойчивой плотностью. Чтобы объяснить, как возможно говорить об устойчивой плотности и гибкости ГЖО, не противоречат ли они друг другу, необходимо вспомнить, что устойчивость с позиций принципов устойчивого подхода определяется как динамическое равновесие, поэтому устойчивая плотность территории также варьируется в определенных пределах и в зависимости от специфических особенностей и факторов ее развития и освоения. Плотность является показателем соотношения застройки и окружающего ее пространства. Поэтому формирование застройки не только должно быть экономически эффективным (это определяется обычно высокой плотностью застроенной территории), но соответствовать экологическим и социальным условиям развития конкретной территории. В этом случае можно говорить об устойчивости планировочного решения и, соответственно, об устойчивой плотности застройки как главного показателя градостроительной эффективности использования этой территории с позиции коэволюционного подхода и устойчивого развития.

В последнее время разрабатывается много новых градостроительных концепций развития территорий городов — это Большая Москва, Grand Paris, Большой Лондон и др. Но, к сожалению, в этих больших, сложных и интересных работах нет четкой концепции развития жилых территорий с позиций формирования комфортного жилья и социально ориентированной городской жилой среды. Формирование и развитие территорий с преобладающей жилой функцией не является в этих концепциях градообразующей составляющей,

напротив, решаются «более приоритетные задачи», такие как оптимизация и развитие транспортной инфраструктуры, увеличение количества озелененных территорий и т. д. Поэтому для формирования «городов, удобных для жизни» [5], необходим альтернативный подход, в котором вопросы формирования современной и комфортной жилой среды будут решаться на основе комплексного интегрированного подхода к градостроительной трансформации их территорий.

Создание гибких и устойчивых жилых образований является одним из главных направлений градостроительного развития территорий. Это наглядно доказывают примеры из зарубежной градостроительной практики, например шведской и ирландской.

Показателен пример градостроительного развития Дублина — столицы Ирландии, которая сегодня является одним из городов Европы, в котором последовательно проводится градостроительная политика улучшения условий жизни для всех категорий его жителей, и это прежде всего связано с потребностями устойчивого развития города. Основой такой градостроительной политики является «Национальная пространственная стратегия Ирландии 2002—2020: люди, поселения, потенциал», которая разработана Министерством окружающей среды и местного самоуправления Ирландии. Основным направлением градостроительного развития Дублина является формирование компактного города с качественной городской средой и хорошей транспортной инфраструктурой. В стратегии развития Дублина до 2020 г. особое внимание уделено концепции «Умный город, содействующий реальному экономическому развитию», прежде всего это использование современных энергосберегающих технологий для улучшения энергообеспечения города. Создание качественной, социально ориентированной, культурной городской среды для всех категорий жителей города и прилегающих к Дублину населенных мест является основой градостроительных преобразования города, это отражено во всех стратегических планах развития его территорий [6]. Так, например, в концепции градостроительного развития города выделено 9 ключевых территорий, развитие которых связано с общими приоритетами градостроительного развития города, одной из них является район North Fringe (Северные окраины) (рис. 1).

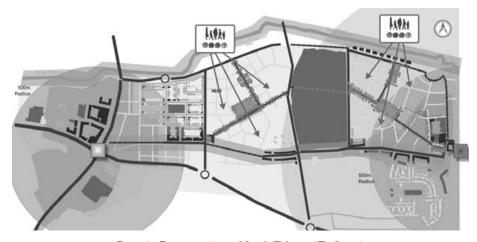


Рис. 1. Схема района North Fringe (Дублин)

Развитие района базируется на создании новой городской среды, на придании нового импульса развитию этой части Дублина на основе обеспечения широкой вариативности типологических решений в формировании архитектурно-планировочных решений жилой застройки, связанной с сохранением специфических особенностей и идентичности территории, которая должна быть гармонично вписана в существующий градостроительный контекст. Формирование жилых образований в районе North Fringe основано на применении интегрированной смешанной типологической структуры застройки и является примером подхода, совмещающего создание идентичности и своеобразия городской среды [7]. Таким образом, применение различных типов жилых домов в одном жилом образовании (квартале) на основе соблюдения стилистического и композиционного единства и гармоничного сочетания различных типов застройки является одной из современных тенденций формирования гибких и устойчивых жилых образований (рис. 2, 3).

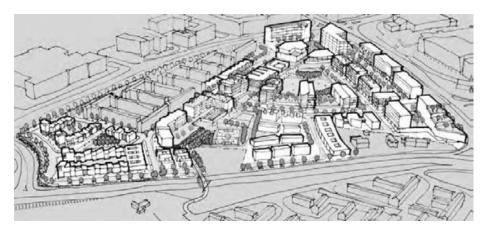


Рис. 2. Перспективное объемно-планировочное решение формирования жилой застройки в Belcamp Line Site — части района North Fringe (Дублин), отражающее принцип планировочной гибкости и вариативности



Рис. 3. Фрагмент макета части района North Fringe (Дублин)

Современные типы жилья [8] — такие как дома смешанной типологии, нейтральные дома, дома-коммуны, дома-гибриды, дома, спроектированные на основе конверсии и реновации промышленных зданий и комплексов, — создают возможность типологической вариативности в формировании идентичной архитектурно-пространственной среды жилых образований в структуре города.

Влияние ландшафтного урбанизма на формирование гибких и устойчивых жилых образований. Ландшафтно-градостроительный подход. В современных градостроительных концепциях развития городов ландшафт играет одну из важнейших, а порой и главную роль в формировании направлений развития градостроительной структуры городов и, соответственно, ее составляющих — жилых территорий (территорий жилой застройки). Природная среда является наиболее устойчивой составляющей пространственно-планировочной структуры города, которую необходимо сохранять и учитывать при разработке новых стратегий развития территорий. Новые ландшафтные технологии и приемы ландшафтного проектирования и строительства позволяют преобразовывать деградирующие территории города, требующие глобальной регенерации и экореконструкции, и создавать там современные ландшафтно-градостроительные объекты, обеспечивающие экоустойчивость и улучшающие окружающую среду прилегающих территорий. Таким образом, такой ландшафтноградостроительный подход направлен на активное включение природы в городскую среду на основе сохранения ее естественного биоразнообразия для формирования идентичного и эстетически привлекательного городского пространства. Флорентийская декларация о ландшафте «подтверждает важность сохранения и усовершенствования ландшафтов: для качества повседневной жизни, культурной самобытности и повышения благосостояния» [9].

Ландшафтный урбанизм — это новый градостроительный подход к развитию и трансформации городов в условиях глобализации, который рассматривает современные проблемы функционирования города через призму ландшафтного подхода, успешно применяемого в современной градостроительной практике.



Рис. 4. Город Мальмё, 1969 г. Район Western Harbour

Одним из наглядных примеров применения методов ландшафтного урбанизма является градостроительная регенерация района Western Harbour г. Мальмё (Швеция), которая началась в 2001 г. В настоящее время крупнейшую в Европе судоверфь, закрытую в начале 1990-х, сменили современные кварталы, основанные на принципах градостроительной гибкости и социальноэкологической устойчивости (рис. 4, 5). Квартал Во01 стал первым выполненным этапом в 20-летнем плане формирования «города будущего» с населением 300 тыс. человек. Первоначально план квартала представлял собой планировочную структуру с прямоугольной системой планировки улиц. В результате проведения комплексного анализа микроклиматических и природных особенностей, а также ландшафтно-градостроительных условий территории схема квартала изменилась (рис. 6). Современная планировочная структура квартала Во01 спроектирована на основе сокращения поперечных связей с прибрежной территорией, таким образом она защищает жителей от сильнейших ветров с моря. Планировочная сетка улиц имеет ломаную геометрию основных осей, которая спроектирована в соответствии с преобладающими потоками ветров с моря. Таким образом, использование местных особенностей ландшафта, микроклимата, социально-экологических условий в создании жилого квартала Во01 является современным примером формирования гибкого и устойчивого жилого образования с экологически ориентированным каркасом на основе градостроительной регенерации бывшей индустриальной территории.



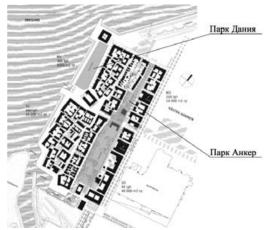


Рис. 5. Город Мальмё, квартал Bo01

Рис. 6. Современный план квартала Bo01

Эффективное ландшафтно-градостроительное зонирование территории позволяет постоянно обогащать и поддерживать биоразнообразие в квартале BoO1, таким образом природа пронизывает весь квартал. Структура озеленения квартала спроектирована на основе принципа дисперсного включения ее элементов в планировочный каркас квартала, поэтому элементы озеленения распространяются не только по земной поверхности, но и по крышам и стенам зданий. Система озеленения квартала BoO1 является примером одной из современных форм организации внутригородских рекреационных территорий, основанной на принципе сохранения и включения местной флоры и фауны в ее структуру, и рассматривается в качестве катализатора и стимулятора развития территории. Экологическая обоснованность ландшафтно-градостроительного зонирования территории квартала направлена не только на улучшение микроклимата, разработку мероприятий по сокращению затоплений домов, устройству зеленых крыш домов и других инженерно-экологических мероприятий, но и на формирование своеобразия и идентичности эстетически привлекательного жилого пространства квартала. Примером этого является создание на территории квартала двух уникальных по своей структуре парков: Анкер и Дания. Парк Анкер — экопарк с воссозданными разнообразными биотопами, которые привлекают различных животных (в том числе и диких), обитающих на прилегающих к кварталу природных территориях. Расположение и форма парка ассоциируются с образом морского берега, тем самым делая его привлекательным и идентичным ландшафтно-рекреационным пространством с ярко выраженной морской стилистикой, повторяющей природный ландшафт этой местности.

Ландшафтно-градостроительное зонирование территории квартала базируется на использования инновационных экологических технологий для формирования инженерной инфраструктуры на всей его территории. Инженерноэкологическая инфраструктура квартала основана на уникальной открытой системе каналов для сбора дождевых вод, которая имеет непосредственную связь с морем. Каналы, пруды и фонтаны на территории квартала соединены в единую инженерную систему сбора, очистки и вторичного использования дождевых и сточных вод, которая используется для орошения озелененных пространств. Необходимость внедрения такой системы, по замыслу ее разработчиков, будет увеличиваться с каждым годом в связи с изменением климата.

Квартал Bo01 — это современный пример адаптации окружающей среды в плотной городской застройке и использования ландшафтно-градостроительного подхода при проектировании жилых городских образований. Градостроительная регенерация территорий бывшей судоверфи в настоящее время является направляющим вектором развития прилегающих территорий города, основанного на принципах социально-экологической устойчивости, градостроительной гибкости и вариативности в разработке архитектурнопланировочной концепции территории.

В настоящее время уже построены кварталы Во01, Во02, Во03 и Во04, но на этом программа развития района Western Harbour не заканчивается. Муниципальная политика направлена на градостроительное преобразование прилегающих территорий для получения поддерживающей динамической устойчивости на основе создания экологически ориентированного каркаса на территории всего города. Характерной особенностью этой программы является активное вовлечение жителей города в реализацию мероприятий по градостроительной трансформации территорий района, приоритетным направлением которой стало формирование устойчивых и гибких жилых образований. Программа основана на использовании интегрированного ландшафтноградостроительного и экологического подходов для создания устойчивости и гибкости в дальнейшем развитии этой территории. Таким образом, комплексный подход в области применения современных экологически ориентированных подходов для градостроительной трансформации территорий дает реальную возможность создания устойчивых и гибких жилых образований в структуре города.

Изучение научно-практических методов и приемов проектирования гибких и устойчивых жилых образований проводится в рамках гранта «OIKOnet. A global multidisciplinary network on housing research and learning» 539369-LLP-1-2013-1-ES-ERASMUS-ENW (http://www.oikonet.org/) на кафедре градостроительства ВолГАСУ (рук. проф. Э. Э. Красильникова, доц. В. А. Русанов). В процессе курсового проектирования по теме «Жилой район» студентами 3-го курса (бакалавры) был выполнен проект планировки жилого района на реальной территории города Волгограда на основе использования современных принципов градостроительной гибкости и устойчивости в формировании жилого квартала как структурной градостроительной единицы района. Разрабатываются три дипломных проекта на тему градостроительной реновации промышленных территорий Волгограда, в задании которых поставлена задача концептуального проектирования устойчивой градостроительной и архитектурно-планировочной модели градостроительной реновации этих территорий города и внедрения в нее гибких и устойчивых жилых образований. Таким образом, изучение современных тенденций формирования гибких и устойчивых жилых образований является важным не только для понимания современных процессов развития градостроительной и пространственнопланировочной структуры городов, но также и для внедрения его изучения в научно-педагогический процесс обучения по специальности «Архитектура».

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Waldheim C. (Editor). The Landscape Urbanism Reader. New York: Princeton Architectural Press, 2006. C. 21—34.
- 2. Farr D. Sustainable Urbanism: Urban design with Nature. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2008. C. 64—83.
- 3. *Бабич В. Н., Кремлев А. Г., Холодова Л. П.* Синергетический подход к архитектурной деятельности // Архитектон: Известия вузов. № 42 июнь 2013. URL:http://archvuz.ru/2013\_2/2 (дата обращения: 10.02.2014).
- 4. Bosselmann P. Urban Transformation: Understanding City Design and Form, Washington, Island Press, 2008. C. 69—72.
- 5. Miranda L., Hordijk M. Let us build cities for life: the National Campaign of Local Agenda 21s in Peru, 1996. URL http://eau.sagepub.com/content/10/2/69.full.pdf (дата обращения: 06.02.2014).
- 6. *Красильникова* Э. Э. Современный ландшафтно-градостроительный подход к созданию городских общественно-рекреационных территорий // Проект Нижняя Волга. 2013. № 4(9). С. 26—32.
- 7. Clongriffin Belmayne (North Fringe) LAP. P. 3. URL: http://www.dublincity.ie/Planning/OtherDevelopmentPlans/LocalAreaPlans/Documents/ClongriffinBelmayneLAP 3.pdf (дата обращения: 01.02.2014).
  - 8. Heckmann O., Schneider F. Grundriss Atlas Wohnungsbau, Birkhäser, 2011.
- 9. Европейская Конвенция о ландшафтах. Флоренция, 20 октября 2000 года. URL: http://www.coe.int/t/dg4/cultureheritage/heritage/landscape/versionsorientation/Russe.pdf.
- 1. Waldheim C. (Editor). The Landscape Urbanism Reader. New York: Princeton Architectural Press, 2006. C. 21—34.
- 2. Farr D. Sustainable Urbanism: Urban design with Nature. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2008. C. 64—83.
- 3. *Babich V. N., Kremlev A. G., Kholodova L. P.* Sinergeticheskiy podkhod k arkhitekturnoy deyatel'nosti // Arkhitekton: Izvestiya vuzov. № 42 iyun' 2013. URL:http://archvuz.ru/2013\_2/2 (data obrashcheniya: 10.02.2014).
- 4. *Bosselmann P.* Urban Transformation: Understanding City Design and Form, Washington, Island Press, 2008. C. 69—72.
- 5. *Miranda L.*, *Hordijk M.* Let us build cities for life: the National Campaign of Local Agenda 21s in Peru, 1996. URL http://eau.sagepub.com/content/10/2/69.full.pdf (data obrashcheniya: 06.02.2014).

- 6. Krasil'nikova E. E. Sovremennyy landshaftno-gradostroitel'nyy podkhod k sozdaniyu gorodskikh obshchestvenno-rekreatsionnykh territoriy // Proekt Nizhnyaya Volga. 2013. N 4(9). S. 26—32.
- 7. Clongriffin Belmayne (North Fringe) LAP. P. 3. URL: http://www.dublincity.ie/Planning/OtherDevelopmentPlans/LocalAreaPlans/Documents/ClongriffinBelmayneLAP3.pdf (data obrashcheniya: 01.02.2014).
  - 8. Heckmann O., Schneider F. Grundriss Atlas Wohnungsbau, Birkhäser, 2011.
- 9. Evropeyskaya Konventsiya o landshaftakh. Florentsiya, 20 oktyabrya 2000 goda. URL: http://www.coe.int/t/dg4/cultureheritage/heritage/landscape/versionsorientation/Russe.pdf.

© Красильникова Э. Э., Русанов В. А., Кузина Л. А., 2014

Поступила в редакцию в феврале 2014 г.

## Ссылка для цитирования:

*Красильникова Э. Э., Русанов В. А., Кузина Л. А.* Современные тенденции формирования гибких и устойчивых жилых образований // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 275—283.

УДК 711-1

## М. Финка, Э. Э. Красильникова

## ГРАДОСТРОИТЕЛЬНАЯ РЕГЕНЕРАЦИЯ: ОТ ПЛАНИРОВАНИЯ ДО УПРАВЛЕНИЯ

Рассматриваются актуальные вопросы градостроительной регенерации городов в условиях глобализации. Анализируется европейский научно-практический опыт, основанный на поэтапном поточном процессе «от планирования до управления», в области градостроительной регенерации и возможности его применения в условиях российской градостроительной практики.

К л ю ч е в ы е с л о в а: градостроительная регенерация, устойчивое городское развитие, градостроительные стратегии развития, структура управления территориями.

In the article the authors discuss current issues of the urban regeneration of cities in the context of globalization. European research and practical experience is analyzed. It is based on a step-by-step flow called "from planning to management" in the field of urban regeneration, as well as possibilities of its application in the Russian urban planning context.

K e y w o r d s: urban regeneration, sustainable urban development, urban development strategies, framework for the urban regeneration management.

Функциональное и структурное разрушение городской ткани в различных частях городов является, к сожалению, естественной составляющей городского развития, которая ограничивает возможность создания вариативного устойчивого жизненного цикла города. Движущей силой динамики процессов расселения является динамика социальных подсистем. Различия между динамикой социальных систем и физического состояния городских структур требует постоянной адаптации. Процессы градостроительной регенерации не являются новациями в эволюционных процессах развития российских городов, но их особенность состоит в динамике, размерах и временном совпадении с общемировым демографическим спадом, изменением климата и процессами глобализации, включая и глобальную конкуренцию. Специфические особенности градостроительной регенерации в Центральной Европе учитывают эти ограничивающие исходные условия, которые являются важными для планирования градостроительных систем в прикладном, методологическом и философском масштабах их понимания.

Градостроительная регенерация и методы градостроительного планирования. Говоря о структуре управления территориями, а именно о градостроительном менеджменте в условиях градостроительной регенерации, необходимо отметить, что существует ряд факторов, влияющих на нее, начиная с природно-географических, которые необходимо рассматривать через призму социально-экономических и социально-культурных критериев развития территорий, и заканчивая рассмотрением формирования экономико-правовой среды, включающей также и правовые основы территориального планирования, и процессы управления территориями. Европа характеризуется различными подходами в области градостроительного планирования и проектирования, эти процессы связаны с многообразием культурной составляющей европейских стран, которое оказывает непосредственное влияние на процессы градоформирования и определяет основные направления градостроительной регенерации (рис. 1).

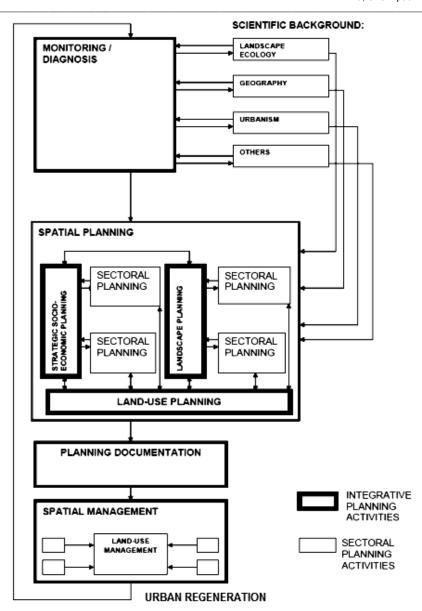


Рис. 1. Схема стуруктурных взамосвязей градостроительной реновации

Масштаб приемов градостроительной регенерации в Европе показывает, что системы пространственного планирования, в особенности Центральной и Южной Европы, долгое время находились под доминированием крупного архитектурного масштаба, который оказал сильное влияние на формирование архитектурного стиля, напрямую связанного с процессами градостроительного проектирования, застройкой города, формированием эстетически привлекательного городского ландшафта и качеством строительства, но без обеспечения соответствующих экономических подходов. Проблему градостроительной регенерации следует понимать в основном как часть управления развитием конкретной (локальной) территории, но акцент такого локального планирования и управления делается не только на непосредственное вмеша-

тельство в процессы регенерации, формирующиеся на более высоком административном уровне. Тем не менее, в ряде случаев инвестирование для решения локальных вопросов также зависит от национальной и региональной политики.

Местные органы государственного управления и власти играют ключевую роль в управлении процессами градостроительной регенерации. План землепользования (аналог ПЗЗ) — главный документ области территориального планирования и градостроительного проектирования — является очень важным, но и не единственным инструментом, определяющим стратегические направления реновации деградирующих и нарушенных территорий. Существует острая необходимость целостного подхода в отношении политики регенерации, интеграции экологических, социальных и экономических масштабов и характера процесса градостроительной реинтеграции, вовлеченных в стратегию развития города.

Муниципалитеты могут играть активную роль в содействии городской регенерации путем предоставления комплекса основных регламентирующих документов, интегрирующихся с секторальной политикой (бюджетных субсидий, пособий, налогов, экологических ограничений, сборов, указаний, поручений, социальных льгот, государственных услуг и ресурсов — сырья, финансов, инфраструктуры, кадрового потенциала). Координация секторальных политик, распределения ресурсов, координация эксплуатации источников во времени и пространстве играет ключевую роль в развитии территориального планирования. Успешная градостроительная регенерация является сложной задачей, требующей совместных усилий различных заинтересованных сторон. Несмотря на то, что местный уровень в процессе градостроительной регенерации имеет решающее значение для достижения скоординированного подхода, также чрезвычайно важным и жизненно необходимым условием успешной градостроительной регенерации является сотрудничество с органами государственной власти, органами местного самоуправления и соседних муниципальных образований. Региональное сотрудничество и проактивная политика государственной поддержки градостроительной регенерации в сочетании с инициативами по разработке проектной документации на местном уровне представляется предпосылкой для обеспечения устойчивого городского развития, в том числе и градостроительной регенерации [1].

Необходимость в интегрированном и интеративном [2] подходе. Относительно широкий масштаб проблем, связанных с градостроительной регенерацией, определяет выбор соответствующих подходов, методов и инструментов в зависимости не только от специфичности проблемы, но и от конконтекста процесса регенерации, который политическими, правовыми, ведомственными, финансовыми и другими условиям. Несмотря на это, логика развития процессов градостроительного освоения территорий позволяет определить структуру (основу, основные направления) градостроительной регенерации в виде поэтапного поточного процесса с конкретными задачами, подходами, методами и инструментами для создания составляющих частей единой интегративной системы. Одна из попыток определения основных направлений в регенерации заброшенных, нарушенных и деградирующих территорий была сделана в рамках проекта LUDA (табл.).

Структура деятельности, связанной с фазами и этапами в планировании, ориентированном на цель совместной стратегии

ориентировинном ни цель совместной стритегии		
Сравнительный	Анализ проблем и	Определение возможностей для преобразований
анализ	диагностики воз-	Определение основных вопросов
	можностей	Сбор информации
		Определение ресурсов
		Критерии оценки
	Анализ заинтересо-	Определение участников проекта
	ванных сторон	Определение интересов участников проекта
		Определение компетенций и возможностей участников
		проекта
		Определение совместных возможностей участников проекта
Перспектива	Анализ поставлен-	Прогнозирование ожидаемых результатов
	ных задач (целей) и	Постановка целей и задач
	их альтернатив	
	Стратегическая конц	епция — альтернативы и сценарий
Прогнозирова-	Планирование	Практическая заинтересованность в посредничестве
ние		всех участников проекта
		Определение общих целей
		Определение общих приоритетов
		Альтернативная стратегическая концепция
		Оценка альтернативных вариантов
		Разработка плана
	Программирование	Составление альтернативного плана реализации —
		практических действий
		Определение необходимых ресурсов для определенных
		видов деятельности
		Выявление имеющихся ресурсов, необходимых для
		инвестиций
		Определение соответствующих участников проекта
		для определенных видов деятельности
		Согласование функций между участниками проекта
		Определение приоритетов — основных направлений
		Описание и характеристика пилотного проекта
		Разработка плана действий — разработка программы
		введения в действие плана, состоящего из выбранных
		действий в определенной системе отношений
Определение	Реализация плана действий — практическая реализация предлагаемых ме-	
индикаторов	роприятий, реализация программной деятельности, координация деятельности и мероприятий между заинтересованными сторонами в реальном време-	
прогресса. Реа-		
лизация проекта		
управления Комплексное управление территориями в рамках землепользования		ение территориями в рамках землепользования
Мониторинг	Осуществление	Предварительная оценка / стратегическая оценка воздейст-
	программы мониторинга	вия
		Исследование процесса реализации
		Оценка процесса реализации
	Постоянный мони-	Исследование процессов развития проектируемой тер-
	торинг развития	
	территории	Оценка территории с позиции устойчивого развития

Важным инструментом реализации градостроительных стратегий является перспективный план как инструмент управления процессами планирования и градостроительной регенерации. Приверженность к поэтапным процессам стратегического планирования выражается в сопоставимости масштабов

перспективных планов, которые разработаны для достижения стратегических целей, определенных в стратегии, а в его состав входят многочисленные методы проверки и оценки фактических масштабов реализации стратегии градостроительной регенерации. Формат перспективного плана зависит от характера и потребностей, определенных в стратегии (CoSGOP), и он должен определять:

- а) цели, которые должны быть осуществлены;
- ь) как каждой цели способствует стратегия общих целей;
- с) какие конкретные результаты (или цели) должны быть выполнены, чтобы, в общем, добраться до цели стратегии;
  - d) каким образом эти результаты будут достигнуты;
  - е) когда будут достигнуты результаты (или сроки для каждой цели).

Успешная организация управления градостроительной регенерацей с целью обеспечения устойчивого развития территорий города является сложной комплексной задачей, требующей совместных усилий различных заинтересованных сторон на различных территориальных и государственных уровнях. Несмотря на то, что местный уровень является ключевым для достижения скоординированного подхода в процессе градостроительной регенерации, региональное сотрудничество и кооперация, а также государственная проактивная политика поддержки устойчивой градостроительной регенерации в комбинации с инициативами по разработке проектных предложений именно на местном уровне представляются непременным условием для деятельности, обеспечивающей сохранение устойчивого градостроительного развития, в том числе и в процессе управления устойчивым землепользованием.

В процессе планирования устанавливаются правила, касающиеся землепользования муниципальных территорий, их функциональной и физической структуры, стратегии развития, лимитов использования территориальных и природных ресурсов, схемы и модели развития территорий. Таким образом, планирование является одним из очень важных, но не единственным из действенных инструментов политики градостроительной регенерации городов. Существует острая необходимость целостного подхода в отношении политики регенерации, которая должна быть основана на интеграции экологических, социальных и экономических аспектов, а также иметь процессуальный характер для реинтеграции заброшенных, нарушенных и деградирующих территорий в функциональной структуре города [3].

Актуальность градостроительной регенерации для устойчивого развития городов России. Европейский опыт в области стратегии градостроительной регенерации является в настоящее время примером для разработки новых научно-практических подходов к развитию и трансформации российских городов. Практически в каждом российском городе имеется достаточное количество депрессивных и нарушенных территорий, занятых заброшенными индустриальными объектами, свалками, ветхой жилой застройкой, которые занимают довольно большие площади городской территории. Целесообразность введения в российскую градостроительную практику таких стратегических программ, как CoSGOP, обоснована необходимостью пересмотра научно-практических и методологических подходов к разработке Правил землепользования и застройки (ПЗЗ), которые должны отражать реальное состояние территории, быть более детально проработанными с учетом новых

подходов к развитию и регенерации не только нарушенных территорий. Необходимо, чтобы ПЗЗ не давали ограничения в области принятия проектных решений, а, наоборот, способствовали выработке комплексного интегрированного и итеративного подхода к развитию городских территорий различного функционального назначения. В настоящее время ПЗЗ представляют собой детальную функциональную схему, выполненную на основе концепции генерального плана города, которая во многих случаях сейчас уже является не актуальной и вследствие этого накладывает серьезные ограничения на выработку действительно гибких и комплексных подходов к развитию территорий на локальных градостроительных уровнях. Поэтому выполнение проектов планировки, связанных с регенерацией проблематичных в градостроительном отношении территорий, опирающихся на градостроительные регламенты ПЗЗ, очень сложно и порой абсолютно бесперспективно, так как в дальнейшем, в процессе реального проектирования, происходят серьезные изменения, требующие корректировок ранее выполненной проектной документации на основе регламентов ПЗЗ. Исходя из этого, целесообразно обратиться к европейскому опыту, а именно на стадии принятия решений о регенерации выбранной территорий выработать стратегический план основных направлений регенерации заброшенных, нарушенных или деградирующих территорий с учетом их специфических особенностей и условий, затем на основе этого плана вносить изменения в ПЗЗ и только после этого приступать к проекту планировки территорий. Такой подход способствует более четкому пониманию процессов развития и управления территорией как на стадии предпроектных исследований, так и в дальнейшем в процессе проектирования и реализации проекта. Такой подход облегчает процесс создания логичного, обоснованного и индивидуального проектного решения, который должен опираться на принципы социально-экономической целесообразности и экологической устойчивости. В европейской градостроительной практике существует большое количество примеров, которые наглядно показывают, как реализуется стратегия CoSGOP на различных градостроительных уровнях — от регенерации небольших индустриальных объектов, расположенных в структуре депрессивной застройки, до регенерации крупных частей города и его пригородных территорий. Такими примерами являются создание «Tatra Gallery» в Попраде (Словакия) на основе регенерации заброшенной пароэлектростанции, регенерация района Karolína в Остраве (Чехия), реализация проекта Spina Centrale в Турине, культурного и творческого центра Эссена (Германия) шахты Zollverein, преобразованной в тематическую станцию регионального проекта «Путь индустриальной культуры» Рурского региона, редевелопмент портовых территорий в Ньюкасл-апон-Тайн (Великобритания), реновация заброшенного промышленного района Кор van Zuid в Роттердаме (Нидерланды), модернизация и функциональная трансформация индустриальных объектов в Делфте (Нидерланды) и многие другие. Данные примеры показывают, как стратегия создания и поддержания самодостаточных локальных территорий от небольших зон до крупных районов в структуре города способствует развитию чувства идентичности городского пространства, стремлению к интеграции новой социально ориентированной инфраструктуры территории в сложившуюся градостроительную ткань города. Таким образом, эти территории становятся активными социально-экономическими катализаторами градостроительного

развития прилегающих территорий, потому вопросы градостроительной регенерации «от планирования до управления» являются чрезвычайно актуальными для развития и трансформации городов третьего тысячелетия в условиях их комплексной реконструкции.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Finka M., Petríková D. Regeneration of Brownfields Conceptual Approach and Examples // Good Practise Cases in Regional Development after Mining and Industry, Uni Graz. Band 42, 2007. C. 9—14.
- 2. *Макконнелл С.* Влияние итеративных подходов на предварительные условия // Совершенный код = Code Complete. Питер, Русская Редакция, 2005. С. 31.
- 3. Finka M. Brownfield Redevelopment Planning Territorial Conditions // In Brownfield Handbook Cross-disciplinary educational tool focused on the issue of brownfield regeneration. VŠB-TU-Ostrava, 2010. C. 165.
- 1. Finka M., Petríková D. Regeneration of Brownfields Conceptual Approach and Examples // Good Practise Cases in Regional Development after Mining and Industry, Uni Graz. Band 42, 2007. S. 9—14.
- 2. *Makkonnell S.* Vliyanie iterativnykh podkhodov na predvariteľnye usloviya // Sovershennyy kod = Code Complete. Piter, Russkaya Redaktsiya, 2005. C. 31.
- 3. Finka M. Brownfield Redevelopment Planning Territorial Conditions // In Brownfield Handbook Cross-disciplinary educational tool focused on the issue of brownfield regeneration. VŠB-TU-Ostrava, 2010. S. 165.

© Финка М., Красильникова Э.Э., 2014

Поступила в редакцию в феврале 2014 г.

Ссылка для цитирования:

Финка М., Красильникова Э. Э. Градостроительная регенерация: от планирования до управления // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 284—290.

# АРХИТЕКТУРА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

УДК 725.83

# Л. П. Шевченко, О. И. Мельникова

# СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ЗАРУБЕЖНЫХ ЯЗЫКОВЫХ ШКОЛ

Рассмотрена актуальность изучения иностранных языков и варианты размещения языковых центров за рубежом. Проанализированы различные подходы и уровни образовательных программ. Описаны дополнительные рекреационные функции и спортивные мероприятия. Проведен анализ функциональной организации зарубежных языковых школ. Даны рекомендации по архитектурному развитию отечественных языковых школ.

K л ю ч е в ы е с л о в а: иностранные языки, языковые курсы, зарубежные языковые школы, организация учебного пространства, дополнительные рекреационные программы, Азово-Черноморское побережье.

The authors consider the relevance of learning foreign languages and variants of location of language centers abroad. Different approaches and levels of educational programs were analyzed. We described additional recreational functions and sport events. The analysis of the functional organization of foreign language schools was held. Recommendations are given for architectural development and arrangement of domestic language schools.

 $K\,e\,y\,$  words: foreign languages, language courses, foreign language schools, the organization of learning space, additional recreational programs, the Azov-Black seaside.

Иностранные языки вошли в нашу жизнь и стали важным инструментом человеческого общения. Владение хотя бы одним иностранным языком открывает широкие возможности в личной, общественной и профессиональной сферах.

В таких обстоятельствах преподование языков стало достаточно преуспевающей сферой бизнеса. По всему миру открылись десятки тысяч школ и языковых центров (рис. 1), предлагающих изучить тот или иной язык.





б



Рис. 1. Зарубежные языковые школы: a — расположение в городской застройке с использованием террас;  $\delta$  — благоустроенная территория жилого кампуса;  $\epsilon$  — централизованный комплекс со спортивными зонами

Существует два варианта размещения таких центров: в стране — носителе изучаемого языка и в стране проживания обучаемого. В первом случае действует метод «погружения в среду» изучаемого языка, во втором случае также стремятся использовать данный метод, поэтому языковые школы могут быть организованы вне мест постоянного проживания.

За рубежом обучение языкам ведется на всех уровнях — от азов языка для детей до курсов делового иностранного языка для взрослых, в том числе как иностранного для преподавателей.

Языковые курсы для детей предполагают разные формы обучения: изучение языка в группе или индивидуальное; обучение с проживанием в доме преподавателя, в рамках школы, в съемной квартире или гостинице; подготовку к школе, получение среднего образования или повышение уровня знания языка.

Взрослым, желающим начать занятия иностранным языком, предлагается достаточно широкий выбор различных курсов: общеобразовательный или деловой, индивидуальный или в специализированной группе и пр. Курсы для деловых людей и преподавателей более специфичны. Деловым людям предлагают программы изучения языка с уклоном в определенную сферу деятельности. Количество человек в группе зависит от уровня и выбранной программы обучения и варьируется от 6 (премиум, бизнес-курс) до 16 человек.

Многие языковые школы являются круглогодичными, что возможно благодаря рекреационному потенциалу местности, в которой они расположены, а также наличию большого числа программ обучения.

Помимо занятий языком, все языковые школы включают в себя дополнительные рекреационные функции (рис. 2): просмотр кинофильмов, уроки национальной кухни, игры на гитаре, серфинга, верховой езды, водные прогулки на катере, экскурсии по городу, творческие вечера, походы в горы, посещение музеев и другие мероприятия. Предлагаются спортивные мероприятия: игра в футбол, волейбол, теннис и т. д.



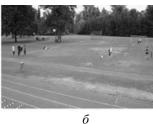




Рис. 2. Дополнительные рекреационные программы: a — занятия конным спортом;  $\delta$  — спортивные игры; s — творческие секции

Как правило, языковые центры за рубежом расположены в исторических городах, в рекреационной местности, в прибрежных и горных населенных пунктах. Учебные аудитории чаще всего расположены в образовательно-административном корпусе. Территория озеленена и на ней организованы площадки для отдыха и занятий спортом на открытом воздухе.

В случае плотной городской застройки предусмотрены учебные классы с выходом на открытые террасы и эксплуатируемую кровлю (рис. 3). Учебное пространство часто организовано в виде «круглых столов», с замкнутым или П-образным расположением учебных мест. В организации учебного процесса широко используется трансформируемая мебель (рис. 4).

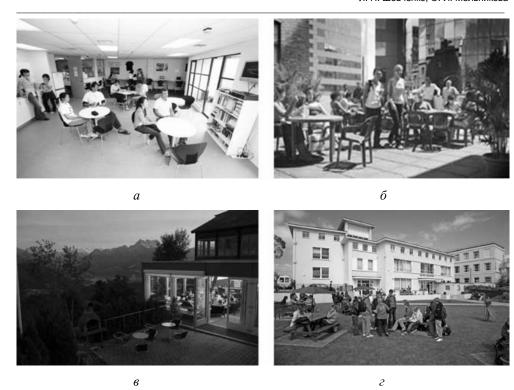


Рис. 3. Организация пространства для отдыха и обучения на открытом воздухе: a — внутри комплекса;  $\delta$  — на открытой террасе;  $\epsilon$  — внутри комплекса на прилегающей террасе;  $\epsilon$  — на территории



Рис. 4. Варианты организации учебного пространства

Зарубежные языковые школы предлагают два варианта проживания: в рамках комплекса и вне его. Обучающийся вправе выбрать для себя наиболее предпочтительный вариант:

в семье;

в студенческом кампусе;

в гостинице (в апартаментах, в студии или в квартире гостиничной резиденции) (рис. 5).



Рис. 5. Варианты организации жилого пространства: a — проживание в семье;  $\delta$  — студенческий кампус;  $\epsilon$  — номер в отеле

В большинстве случаев корпуса находятся в пешеходной доступности друг от друга и от рекреационных городских объектов, таких как исторический центр, пляж, набережная, культурно-развлекательные объекты.

Отечественные языковые школы пока не получили столь широкого распространения и предлагают свои услуги в местах постоянного проживания обучающихся. Школы, как правило, размещены в помещениях, неприспособленных для занятий, предлагают стандартные общеобразовательные программы без дополнительных мероприятий. Зачастую в таких условиях пропадает момент «погружения» в языковую среду.

Для использования метода «погружения» в условиях среды, не связанной с изучаемым языком, рекомендуются централизованные комплексы с включением в них всех функций. Такой принцип будет способствовать непрерывному общению на изучаемом языке и, следовательно, изучению языка на протяжении всего периода обучения. Необходимо при организации языковых школ включать в них рекреационные функции.

На юге России к территориям с хорошими природно-климатическими и рекреационными условиями для организации языковых школ относится Азово-Черноморское побережье. При проектировании языковых школ и центров рекомендуется использовать зарубежный опыт строительства и эксплуатации данного рода объектов.

© Шевченко Л. П., Мельникова О. И., 2014

Поступила в редакцию в январе 2014 г.

#### Ссылка для иитирования:

*Шевченко Л. П., Мельникова О. И.* Современные тенденции функциональной организации зарубежных языковых школ // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 36(55). С. 291-294.

#### НАШИ АВТОРЫ

Абрамян Сусанна Грантовна Abramyan Susanna Grantovna

Акчурин Талгать Кадимович Akchurin Talgat' Kadimovich

Анопин Владимир Николаевич Anopin Vladimir Nikolaevich

Асланов Лятиф Aslanov Lyatif

Атопов Владимир Иванович Atopov Vladimir Ivanovich

Ахмедов Асвар Микдадович Akhmedov Asvar Mikdadovich

Багиров Камил Алибала оглы Bagirov Kamil Alibala ogly

Бандурин Николай Григорьевич Bandurin Nikolay Grigor'evich

Белан Иван Васильевич Belan Ivan Vasil'evich

Беликов Георгий Иванович Belikov Georgiy Ivanovich

Бережная Екатерина Викторовна Berezhnaya Ekaterina Viktorovna

Беспалая Елена Николаевна Bespalava Elena Nikolaevna

Богданов Виктор Иванович Bogdanov Viktor Ivanovich

канд. техн. наук, доц., проф. кафедры технологии строительного производства, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Волгоград, 400074, ул. Академическая, 1, <u>susan-</u> nagrant@mail.ru

Candidate of Engineering Science, Docent, Professor of Construction Technology Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federa-

канд. техн. наук, проф., зав. кафедрой строительных материалов и специальных технологий, Волгоградский государственный архитектурностроительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академиче-

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

д-р географ. наук, проф., зав. кафедрой геодезии, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1
Doctor of Geographical Science, Professor, the Head of Geodesy Department,

Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

канд. техн. наук, доцент, Азербайджанский архитектурно-строительный университет (АзАСУ). Азербайджан, г. Баку, ул. Айна Султанова, 5, latif.aslanov@rambler.ru

Candidate of Engineering Science, Docent, Azerbaijan University of Architecture and Constraction (AUAC). 5, Aina Sultanova St., Baku, Azerbaijan канд. техн. наук, профессор, профессор кафедры технологии строительного производства, Волгоградский государственный архитектурного производства, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академиче-

Candidate of Engineering Science, Professor, Professor of Construction Technology Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

аспирант кафедры технологии строительного производства, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, <u>asvar05@mail.ru</u>

Postgraduate Student of Construction Technology Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation заместитель начальника управления МЧС Азербайджанской Республики,

генерал-майор, <u>farchad@yandex.ru</u> Deputy Head of the Ministry of Emergency Situations of the Azerbaijan Repub-

lic, major-general

д-р техн. наук, проф., проф. кафедры строительной механики, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГА-СУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, <u>bandurin\_ng@mail.ru</u>

Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of Structural Mechanics Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, bandurin\_ng@mail.ru

аспирант кафедры теоретической и прикладной физики, Новосибирский государственный аграрный университет. 630039, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 160, <u>gmunsau@mail.ru</u> Postgraduate Student of Theoretical and Applied Physics Department, Novosi-

birsk State Agricultural University. 160, Dobrolyubova St., Novosibirsk, 630039, Russian Federation

д-р техн. наук, доцент, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Волгоград, 400074, ул. Академиче-

Doctor of Engineering Science, Docent, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

канд. техн. наук, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет (ХНАДУ). Украина, Харьков, ул. Петровского,

KMKSM@rambler.ru
Candidate of Engineering Science, Kharkov National Automobile and Highway University (KhNAHU). 25, Petrovskogo St., Kharkov, Ukraine канд. пед. наук, доцент кафедры высшей математики, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074. Волгоград, ул. Академическая, 1

Candidate of Pedagogical Science, Docent of Higher Mathematics Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

канд. техн. наук, доцент, проф. кафедры технологических процессов и машин, Волжский институт строительства и технологий (ВИСТех) — филиал ВолгГАСУ. 404111, г. Волжский Волгоградской обл., пр. Ленина, 72, info@visteh.net.

**Богомолов Александр Николаевич** Bogomolov Aleksandr Nikolaevich

Candidate of Engineering Science, Docent, Professor of Technological Processes and Machines Department, Volzhsky Institute of Civil Engineering and Technologies (VISTeh) – Affiliate Institute of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 72, Lenina Prospect, Volzhskiy, 404111, Volgograd Oblast, Russian Federation

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой гидротехнических и земляных сооружений, проректор по научной работе, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1

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

проф. кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, <u>banzaritcyn@mail.ru</u>

Professor of Construction Operations and Geotechnics Department, Perm National Research Polytechnic University. 29, Komsomolskiy Prospect, Perm, 614990, Russian Federation

студент, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Волгоград, 400074, ул. Академическая, 1 Student, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering

Student, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation канд. техн. наук, доцент кафедры прикладной математики и вычислительной техники, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1

Candidate of Engineering Science, Docent of Applied Mathematics and Computer Engineering Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

канд. техн. наук, зав. лабораторией оснований, фундаментов и механики грунтов, Азербайджанский архитектурно-строительный университет. Азербайджан, г. Баку, улица Айна Султанова, 5

Candidate of Engineering Science, the Head of the Laboratory of Bases, Foundations and Soil Mechanics, Azerbaijan University of Architecture and Construction (AUAC). 5, Aina Sultanova St., Baku, Azerbaijan

соискатель Института химических проблем экологии PAEH degree-seeking student of the Institute of Chemical Problems of Ecology of

д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой. строительных материалов, Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ). 398600, г. Липецк, ул. Московская, 30

Doctor of Engineering Science, Docent, the Head of Construction Materials Department, Lipetsk State Technical University. 30, Moskovskaya St., Lipetsk, 398600, Russian Federation

аспирант, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1 Postgraduate Student, Volgograd State University of Architecture and Civil

Postgraduate Student, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

канд. техн. наук, доцент, профессор кафеды водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, viv\_vgasu@mail.ru

Candidate of Engineering Science, Docent, Professor of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

д-р техн. наук, проф., проф. кафедры оснований и фундаментов, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова (ЮРГПУ(НПИ)). 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

ул. Просвещения, 132 Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of Bases and Foundations Department, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI). 132, Prosyeshcheniya St. Novocherkassk, 346428, Russian Federation

Prosveshcheniya St., Novocherkassk, 346428, Řussian Federation д-р техн. наук, член-кор. РААСН, профессор, заведующий кафедрой строительных материалов и технологий, Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева. 430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевистская, 68

Doctor of Engineering Science, Corresponding member of RAACS, Professor, the Head of Construction Materials and Technologies Department, Mordovia N.P. Ogarev State University. 68, Bolshevistskaya St., Saransk, 430005, the Republic of Mordovia, Russian Federation

старший преподаватель кафедры экономики и управления дорожным хозяйством, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1

Senior Lecturer of Economics and Road Facilities Management Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

**Богомолов Сергей Александрович** Bogomolov Sergey Aleksandrovich

**Богомолова Оксана Александровна** Bogomolova Oksana Aleksandrovna

Габибов Фархаддин Гасанович Gabibov Farkhaddin Gasanovich

Ганицев Максим Петрович Ganitsev Maksim Petrovich

Гончарова Маргарита Александровна Goncharova Margarita Aleksandrovna

Горюнова Екатерина Игоревна Goryunova Ekaterina Igorevna

Доскина Эльвира Павловна Doskina Elvira Pavlovna

**Дыба Владимир Петрович** Dyba Vladimir Petrovich

**Ерофеев Владимир Трофимович** Erofeev Vladimir Trofimovich

**Ерохин Андрей Вячеславович** Erokhin Andrey Vyacheslavovich

Иванищева Наталья Владимировна Ivanishcheva Natal'va Vladimirovna

Игнатьев Александр Владимирович

Кавыгин Александр Александрович Kavygin Aleksandr Aleksandrovich

Калашников Сергей Юрьевич Kalashnikov Sergey Yur'evich

Ignat'ev Aleksandr Vladimirovich

Килакоев Альберт Мухолинович Kidakoev Albert Mukhodinovich

Ковылин Андрей Васильевич Kovylin Andrey Vasil'evich

Колодяжный Сергей Александрович Kolodyazhny Sergey Aleksandrovich

Корвяков Федор Николаевич Korvyakov Fedor Nikolaevich

Коростелева Наталия Владимировна Korosteleva Natal'ya Vladimirovna

Красильникова Элина Эдуардовна Krasil'nikova Flina Eduardovna

Кузина Лариса Анатольевна Kuzina Larisa Anatol'evna

Кузьмина Татьяна Алексеевна Kuz'mina Tat'vana Alekseevna

аспирант кафедры энергоснабжения и теплотехники, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074. Волгоград, ул. Академическая, 1, nativa8@yandex.ru

Postgraduate Student of Power Supply and Heat Engineering Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

канд. техн. наук, доц., Волгоградский государственный архитектурностроительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1

Candidate of Engineering Science, Docent, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

начальник технического отдела, ЗАО «Рязвент Плюс»; аспирант, Воронеж ский государственный архитектурно-строительный университет (ВГАСУ). 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Head of Technical Department, "Ryazvent Plus" CJSC; Postgraduate Student, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. 84, 20-let Oktyabrya St., Voronezh, 394006, Russian Federation, kavigin@vkt.cc

д-р техн. наук, профессор, действительный член Международной академии наук высшей школы, ректор, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Акаде-

Doctor of Engineering Science, Professor, Academician of the International Higher Education Academy of Sciences, rector, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

канд. техн. наук, зав. каф. общеинженерных дисциплин, Северо-Кавказская государственная гуманитарно-технологическая академия. 396001, Карачаево-Черкесская республика, г. Черкесск, ул. Ставропольская, 36, kidako-

evam@mail.ru Candidate of Engineering Science, the Head of General Engineering Disciplines Department, North Caucasian State Humanitarian Technological Academy. 36, Stavropolskaya St., Cherkessk, 396001, Karachaevo-Cherkessian Republic, Russian Federation

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры энергоснабжения и теплотехники, Волгоградский государственный архитектурностроительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академиче-

Candidate of Engineering Science, Senior Lecturer of Power Supply and Heat Engineering Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian

канд. техн. наук, доцент, проректор по учебной работе, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет (ВГАСУ). 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, vent. 2008@mail.ru

Candidate of Engineering Science, Docent, Provost for academic affairs, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. 84, 20-let Oktyabrya St., Voronezh, 394006, Russian Federation

аспирант кафедры строительных материалов, Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ). 398600, г. Липецк, ул. Московская, 30 Postgraduate Student of Construction Materials Department, Lipetsk State Technical University. 30, Moskovskaya St., Lipetsk, 398600, Russian Federation

канд, техн, наук, доцент, доцент кафедры экологического строительства и городского хозяйства, Волгоградский государственный архитектурностроительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Акадег ская 1 korostelevany@mail.ru

Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Ecological Building and Municipal Facilities Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

канд. арх., доцент, професор кафедры градостроительства, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1

Candidate of Architecture, Docent, Professor of Urban Development Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUA-CE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, landurbanizm@gmail.com

аспирант, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1,

Postgraduate Student, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian

аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский госу

дарственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, viv yqasu@mail.ru

Postgraduate Student of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

# Логанина Валентина Ивановна

Loganina Valentina Ivanovna

Любченко Анна Степановна Lyubchenko Anna Stepanovna

Матовников Сергей Алексеевич Matovnikov Sergey Alekseevich

Матовникова Наталья Геннадьевна Matovnikova Nataľva Gennaďevna

**Мельников Валерий Васильевич** Mel'nikov Valeriy Vasil'evich

**Мельникова Елена Игоревна** Mel'nikova Elena Igorevna

**Мельникова Олеся Игоревна** Mel'nikova Olesya Igorevna

**Михальчук Артем Владимирович** Mikhal'chuk Artem Vladimirovich

**Москвичева Анастасия Владимировна** Moskvicheva Anastasia Vladimirovna

**Москвичева Елена Викторовна** Moskvicheva Elena Viktorovna

Муслимова Дина Рифатовна Muslimova Dina Rifatovna

Онищенко Екатерина Валерьевна Onishchenko Ekaterina Valer'evna

Павлов Дмитрий Вадимович Pavlov Dmitriy Vadimovich д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой управления качеством и технологии строительного производства, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (ПГУАС). 440028, г. Пенза, улица Германа Титова, 28, loganin@mail.ru

Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Quality Management and Technology of Building Production Department, Penza State University of Architecture and Civil Engineering. 28, Germana Titova St., Penza, 440028, Russian Federation

канд. техн. наук, доцент кафедры изысканий и проектирования транспортных сооружений, Волгоградский государственный архитектурностроительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, <a href="mailto:lubchenko-ann@mail.ru">lubchenko-ann@mail.ru</a> Candidate of Engineering Science, Docent of Research and Design of Transport

Candidate of Engineering Science, Docent of Research and Design of Transport Works Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

канд. арх., доцент, первый проректор, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, matovnikov4@yandex.ru

Candidate of Architecture, Docent, first provost, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

канд. географ. наук, доцент, доцент кафедры архитектуры, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, matovnikova@yandex.ru

Candidate of Geographical Science, Docent, Docent of Architecture Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

старший преподаватель кафедры строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1 Senior Lecturer of Construction and Operation of Transport Works Department,

Senior Lecturer of Construction and Operation of Transport Works Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

аспирант, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1 Postgraduate student, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian

Federation аспирант кафедры архитектуры жилых и общественных зданий, Южный федеральный университет. 344006, Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая,

Postgraduate Student of Architecture of Living Accommodation and Public Buildings Department, Southern Federal University. 105/42, B. Sadovaya St., Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation

ассистент кафедры экономики и управления недвижимостью, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГА-СУ), Волгоград, 400074, ул. Академическая, 1

Postgraduate Student of Economics and Property Management Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Noncomberging (VSUACE).

Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation канд. техн. наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (Волг-

ГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, viv vgasu@mail.ru Candidate of Engineering Science, Docent of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Академіснеєкауа St., Volgograd, 400074, Russian Federation д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, viv\_vgasu@mail.ru 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 Endostries.

студентка, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1

Student, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation аспирант кафедры строительной механики, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград. ул. Академическая. 1

Postgraduate Student of Structural Mechanics Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

аспирант кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГА-СУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1
Postgraduate Student of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgo-

Postgraduate Student of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

#### Пичугин Анатолий Петрович Pichugin Anatoliy Petrovich

Подлинев Максим Олегович Podlinev Maksim Olegovich

Попова Анна Владимировна Popova Anna Vladimirovna

Пышкина Ирина Сергеевна Pyshkina Irina Sergeevna

Рахимов Александр Имануилович Rakhimov Aleksandr İmanuilovich

Русанов Владимир Александрович Rusanov Vladimir Aleksandrovich

Самойленко Максим Андреевич Samoylenko Maksim Andreevich

Сапожкова Наталья Васильевна Sapozhkova Natal'ya Vasil'evna

Серова Елена Юрьевна . Serova Elena Yur'evna

Сидоренко Владимир Федорович Sidorenko Vladimir Fedorovich

Скибин Геннадий Михайлович Skibin Gennadiy Mikhaylovich

Скоробогатченко Дмитрий Анатольевич Skorobogatchenko Dmitriy Anatol'evich

Соколов Антон Иванович Sokolov Anton Ivanovich

д-р техн. наук, проф., Новосибирский государственный аграрный универси-

тет (НГАУ). 630039, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 160
Doctor of Engineering Science, Professor, Novosibirsk State Agricultural University. 160, Dobrolyubova St., Novosibirsk, 630039, Russian Federation

аспирант кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГА-CУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1
Postgraduate Student of Hydraulic and Earthwork Structures Department,

Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

учебный мастер кафедры энергоснабжения и теплотехники, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

400074, Волгоград, ул. Академическая, 1 Training master of Power Supply and Heat Engineering Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

аспирант кафедры управления качеством и технологии строительного производства, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. 440028, г. Пенза, улица Германа cheese15@rambler.ru

Postgraduate Student of Quality Management and Technology of Building Production Department, Penza State University of Architecture and Civil Engineering, 28, Germana Titova St., Penza, 440028, Russian Federation

д-р хим. наук, профессор, проф. кафедры органической химии, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). 400005, Волгоград, пр. Ленина, 28

Doctor of Chemical Science, Professor, Professor of Organic Chemistry Department, Volgograd State Technical University. 28, Lenina Prospect, Volgograd, 400005, Russian Federation

доцент кафедры градостроительства, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, <u>buro2m@mail.ru</u>

Docent of Urban Development Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074. Russian Federation

аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский госу-

аспірант кафедрів водоснаюжения и водоснаения, волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, <u>viv. vgasu@mail.ru</u>

Postgraduate Student of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

канд. техн. наук, доцент кафедры строительства и эксплуатации транс-портных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, <u>sapozhkovanv@rambler.ru</u>

Candidate of Engineering Science, Docent of Construction and Operation of Transport Works Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

канд. техн. наук, доцент кафедры строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1 Candidate of Engineering Science, Docent of Construction and Operation of Transport Works Department, Volgograd State University of Architecture and

Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ, зав. кафедрой экологического строительства и городского хозяйства. Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074,

Волгоград, ул. Академическая, 1 Doctor of Engineering Science, Professor, Honoured Science Worker of the RF, the Head of Ecological Building and Municipal Facilities Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой оснований и фундаментов, Южно-

Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова (ЮРГПУ(НПИ)). 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Bases and Foundations Department, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI). 132, Prosveshcheniya St., Novocherkassk, 346428, Russian Federation

д-р экон. наук, доцент, доцент кафедры экономики и управления дорожным хозяйством, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1

Doctor of Economics, Docent, Docent of Economics and Road Facilities Management Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian

канд. арх., архитектор, ООО «Полиграфсервис-99», 8-903-468-51-20 Candidate of Architecture, Architect, "Poligrafservis" Ltd.

Соколов Иван Иванович

Sokolov Ivan Ivanovich

Старов Александр Васильевич Starov Aleksandr Vasil'evich

Стебловский Илья Арчилович Steblovskiv II'va Archilovich

Уманцев Денис Алексеевич Umantsey Denis Alekseevich

Усадский Денис Геннадиевич Usadskiy Denis Gennadievich

Ушаков Андрей Николаевич Ushakov Andrey Nikolaevich

Финка Марош Finka Maroš

Фокин Владимир Михайлович Fokin Vladimir Mikhaylovich

Фоменко Николай Александрович Fomenko Nikolay Aleksandrovich

Фомичев Валерий Тарасович Fomichev Valeriy Tarasovich

**Халилов Вячеслав Сергеевич** Khalilov Vyacheslav Sergeevich

**Хританков Владимир Федорович** Khritankov Vladimir Fedorovich

Хуторской Сергей Владимирович Khutorskoy Sergey Vladimirovich канд. арх., проф., проф. кафедры градостроительства, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, <u>q-pavlov@mail.ru</u>

Candidate of Architecture, Professor, Professor of Urban Development Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

канд. техн. наук, доц., доц. кафедры строительной механики, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГА-СУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, <a href="mailto:starov1954@mail.ru">starov1954@mail.ru</a>

Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Structural Mechanics Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation аспирант кафедры мостов, конструкций и строительной механики, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет (ХНАДУ). Украина, Харьков, ул. Петровского, 25, sreblovsky@me.com

Postgraduate Student of Bridges, Constructions and Structural Mechanics Department, Kharkov National Automobile and Highway University (KhNAHU). 25, Petrovskogo St., Kharkov, Ukraine

магистрант, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1 Master's degree student, Volgograd State University of Architecture and Civil

Master's degree student, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

аспирант кафедры энергоснабжения и теплотехники, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1obmol@bk.ru
Postgraduate Student of Power Supply and Heat Engineering Department,

Postgraduate Student of Power Supply and Heat Engineering Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

канд. техн. наук, доц., докторант кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, andrey.ushakov@vgi.volsu.ru

Candidate of Engineering Science, Docent, PhD candidate of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

PhD, профессор, директор Центрально-европейского исследовательского и учебного центра «СПЕКТРА», Словацкий технический университет в Братиславе. Словакия, 81243, Братислава, ул. Вазовова, 5, <u>maros.finka@stuba.sk</u>

PhD, Professor, Director of "SPECTRA" Centre of Excellence of the EU, Slovak University of Technology in Bratislava. 5, Vazovova St., Bratislava, 81243, Slovakia

д-р техн. наук, профессор, заведующий каф. энергоснабжения и теплотехники, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1

Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Power Supply and Heat Engineering Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

канд. техн. наук, доцент, Волгоградский государственный архитектурностроительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая. 1

Candidate of Engineering Science, Docent, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой общей и прикладной химии, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (Волг-ГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, (442)96-98-14

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

магистрант, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1

Master's degree student, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

д-р техн. наук, проф., проф. кафедры теоретической и прикладной физики, Новосибирский государственный аграрный университет. 630039, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 160

Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of Theoretical and Applied Physics Department, Novosibirsk State Agricultural University. 160, Dobrolyubova St., Novosibirsk, 630039, Russian Federation

инженер, архитектурно-строительный факультет, Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева. РФ, 430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевистская, 68, sergeohut@rambler.ru

Engineer, Architecture and Civil Engineering Department, Mordovia N.P. Ogarev State University. 68, Bolshevistskaya St., Saransk, 430005, the Republic of Mordovia, Russian Federation

**Шевченко Леонид Петрович** Shevchenko Leonid Petrovich

Шкода Галина Германовна Shkoda Galina Germanovna

Шубин Михаил Алексеевич Shubin Mikhail Alekseevich канд. арх., профессор, профессор кафедры архитектуры жилых и общественных зданий, Южный федеральный университет. 344006, Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, <u>LP-Sh@yandex.ru</u>

Candidate of Architecture, Professor, Professor of Architecture of Living Accommodation and Public Buildings Department, Southern Federal University. 105/42, B. Sadovaya St., Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation

канд. техн. наук, доцент кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, galinashkoda@yandex.ru

Candidate of Engineering Science, Docent of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

д-р геол.-минерал. наук, проф., заслуженный эколог РФ, проф. кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). 400074, Волгоград, ул. Академическая. 1

Doctor of Geological and Mineral Sciences, Professor, Honoured Ecologist of the Russian Federation, Professor of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

**Примечание.** С авторами статей — аспирантами, докторантами и сотрудниками ВолгГАСУ — можно связаться по e-mail: <u>info@vgasu.ru</u> (в теме письма указать наименование структурного подразделения, фамилию и инициалы адресата).

#### ОТ РЕЛКОЛЛЕГИИ

«Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета» со второго полугодия 2007 г. временно выходит в одной серии «Строительство и архитектура», по 4 выпуска ежегодно.

Журнал включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Библиографические сведения о публикациях в журнале, пристатейные списки литературы и полные тексты статей представлены в **Российском индексе научного цитирования** (РИНЦ) на сайте Научной электронной библиотеки www.elibrary.ru.

«Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия «Строительство и архитектура» входит в базу данных **Ulrich's Periodicals Directory** американского издательства Bowker, являющуюся самой крупной базой, описывающей мировой поток сериальных (периодических и продолжающихся) изданий. Активно используется научными учреждениями для анализа мирового потока сериальных изланий.

Серия включена в базу данных **DOAJ** — **Directory of Open Access Journals** (Директория журналов открытого доступа) научной библиотеки университета г. Лунд (Швеция), www.doaj.org, обеспечивающую открытый доступ к полнотекстовым материалам научных и академических журналов на различных языках, поддерживающих систему контроля качества публикуемых статей.

Требования к оформлению статей и сопроводительных материалов. Статью необходимо представить на электронном носителе и в распечатанном виде (2 экз.) в сопровождении заполненного автором лицензионного договора (2 экз.) (скачать бланк по адресу http://www.vgasu.ru/science/journals/herald-volggasu/preparation-requirements/), анкеты согласия автора на доступ к его персональным данным неограниченного круга лиц (скачать бланк по адресу http://www.vgasu.ru/science/journals/herald-volggasu/preparation-requirements/), выписки из протокола заседания кафедры и одной рецензии. К статьям прилагается экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати. Все сопроводительные документы представляются на бумажных носителях в оригинате

В *отдельном файле помещаются сведения об авторах* на русском и английском языках, а также кириллицей и латиницей в полном соответствии с данными в заполненном бланке *анкеты* (см. выше): фамилия, имя, отчество (полностью), ученая степень, звание, должность, место работы; наименование и код научной специальности (по Номенклатуре), по которой автор проводит диссертационное исследование; почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты.

В статье приводятся: индекс УДК; на русском и английском языках: фамилия и инициалы автора, заглавие, аннотация (на русском языке до 500 знаков, на английском — от 500 знаков до целой страницы), ключевые слова. Текст статьи заверяется личной подписью автора (соавторов).

Объем статьи — от 10 с. установленного формата «Вестника» (см. ниже), включая название, аннотации, ключевые слова, текст, таблицы, рисунки, библиографический список. Последняя страница считается полной независимо от фактического заполнения.

Оригинал статьи должен быть набран с помощью пакета программ  $Microsoft\ Office\ (Word\ 2003)$ ; шрифт  $ochobhozo\ mekcma\ —$  Times New Roman (Cyr) № 11 (11 пунктов). Параметры страницы — поля, см: верхнее — 3,7; нижнее — 4,5; левое — 2,0; правое — 6,0; переплет — 0, поля зеркальные. Расстояние от края до верхнего колонтитула, см — 3,0, от края до нижнего колонтитула — 3,7. Абзацный отступ равен 0,75 см. Межстрочный интервал одинарный. Автоматически устанавливаются переносы (не более 4 подряд в одном абзаце). Автоматически устанавливается запрет висячих строк.

Для набора формул используется редактор формул Microsoft MathType 5; по умолчанию устанавливаются размеры шрифта для одно- и двухстрочных формул: обычного — 11 пт, крупного и мелкого индекса — соответственно 8 и 6 пунктов, крупного и мелкого символа — соответственно 16 и 11 пунктов. Греческие и русские буквы набираются прямым шрифтом, латинские — курсивом. Если написание в формулах отличается от традиционного, автор должен сделать соответствующие пометки на полях распечатанной статьи, при этом греческие буквы обводятся красным карандашом, готические — синим. Формулы выключаются в левый край с абзащным отступом. Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

Векторные рисунки, сохраненные в формате WMF, растровые — в ТІГ или ВМР; графики и диаграммы, построенные в Microsoft Excel, а также рисунки, созданные в Corel Draw 12 или AutoCAD 2006 и сохраненные в оригинальном формате, дополнительно помещаются на электронный носитель отдельными файлами. Имя файла должно соответствовать наименованию или номеру рисунка в тексте статъи. Кроме того, иллострации обязательно присылаются распечатанными на отдельных листах формата А4 в масштабе 1:1, в пригодном для сканирования виде. Размер шрифта текста в рисунках — 9-10 пт. Подписи к рисункам выполняются непосредственно в тексте статъи шрифтом Times № 10 (10 пт), экспликация в подрисуночной подписи — Times № 9 (9 пт). Для сжатия больших файлов использовать архиваторы Arj и WinZip, WinRAR.

Цветные и черно-белые фотографии присылать в оригинальном виде с подписями на обороте. Цифровые фотографии выполнять с разрешением не менее 300...600 dpi, присылать в электронном виде в любом графическом формате, кроме .jpg.

Текст *таблиц* набирается шрифтом Times New Roman (Cyr) № 10 (10 пунктов).

Пристатейные баблиографические списки размещаются после основного текста статьи.

В библиографическом списке приводится только цитируемая в статье литература. Библиографический список должен состоять не менее чем из 15 статей в научных журналах, из них 8 — иностранные. Источники группируются в списке в порядке упоминания в тексте. Ссылки на источники приводятся в тексте в квадратных скобках (запрещается использовать ссылки-сноски для указания источников). В библиографическую запись включаются только основные элементы библиографического описания (ГОСТ 7.0.5–2008). Разделительные знаки «тире» между областями опускаются. Шрифт Times New Roman (Суг) № 9 (9 пунктов). Язык библиографических записей соответствует языку описываемых источников.

Библиографический список приводится дважды. Во втором варианте все русскоязычные библиографические записи приводятся на латинице, записи на других языках просто повторяются.

Авторы статей несут всю полноту ответственности за содержание статей и за сам факт их публикации. Редакция журнала не несет никакой ответственности перед авторами и/или третыми лицами и организациями за возможный ущерб, нанесенный публикацией статьи. Редакция исходит из того, что, в соответствии с законодательством в части авторского права, автор, направляя статью в редакцию, полностью соглашается с условиями редакции и, следовательно, только сам лично несет ответственность за использование в текств статьи материалов третых лиц и соблюдение их авторских прав. Все права автора и вся полнота его ответственности сохраняются и после публикации статьи в журнале.

Статьи проверяются на оригинальность с помощью системы «Антиплагиат». Требуемая оригинальность — не менее 80%.

Порядок рецензирования. Статьи обсуждаются редколлегией, рецензии, поступившие в сопроводительных материалах, учитываются. Статьи могут быть направлены редакцией на дополнительную внутреннюю или внешнюю экспертизу (рецензирование) и опубликованы только при положительном заключении. Имена авторов и рецензентов друг другу не сообщаются. Копия заключения предоставляется автору.

Статьи, не отвечающие изложенным требованиям, редколлегией не принимаются. Материалы, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются.

Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения текста. Корректура статей авторам не предоставляется. Согласование редакционных и авторских изменений текста статьи (переписка, тел. переговоры) производится за счет автора.

Гонорар за опубликование статьи не выплачивается, плата за публикацию статей с аспирантов не взимается.

КОМПЛЕКТОВАНИЕ ОЧЕРЕДНОГО НОМЕРА ЗАВЕРШАЕТСЯ ЗА 3 МЕСЯЦА ДО ПЛАНИРУЕМОГО ВЫХОДА В СВЕТ.

Примерный график выпуска серии «Строительство и архитектура» — март (прием статей до 1 декабря); июнь (прием статей до 1 марта); сентябрь (прием статей до 1 июня); декабрь (прием статей до 1 сентября).

ISSN 1815-4360. Серия «Строительство и архитектура»

# Тематические рубрики

Строительные конструкции, здания и сооружения. Основания, фундаменты, подземные сооружения. Строительная механика. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов. Строительные материалы и изделия. Гидротехническое строительство. Гидравлика и инженерная гидрология. Технология и организация строительства. Безопасность жизнедеятельности и охрана труда в строительстве. Инновации в строительном производстве, интенсификация, энергосбережение и энергоэффективность. Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности. Градостроительство. Теория

развития города. Управление инвестиционно-градостроительной деятельностью. Экологические проблемы градостроительства. Информационные технологии в строительстве и архитектуре. Научно-методический раздел. Организация высшего образования в области строительства и архитектуры. Методика преподавания дисциплин строительного и архитектурного направлений в вузе. Хроника.

Подробная информация о журнале представлена на сайте ВолгГАСУ <u>www.vgasu.ru</u>, в разделе *Наука / Научные журналы / Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета* (сразу после подписания выпуска в печать на сайте публикуются титул и содержание; через месяц со дня выхода очередного номера из печати на сайте размещается его полнотекстовый файл).

Статьи направлять по адресу: 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, ком. Б-314а. Редакция «Вестника ВолгГАСУ». Тел. (8442)-96-98-46. E-mail: info@vgasu.ru (для В.И. Воробьева).

Уточнить *условия публикации статей и приобретения* очередного номера журнала можно по тел. (8442)-96-98-46 у ответственного секретаря редсовета журнала Владимира Ивановича Воробьева.

За консультацией по вопросам подготовки авторского оригинала статьи к печати обращаться по адресу: 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, ком. В-210, редакционно-издательский отдел ВолгГАСУ. Тел. (8442)-96-98-28. E-mail: <u>mariapes@mail.ru</u>.

# Вниманию читателей и авторов!

«Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета» временно выходит в одной серии

«СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА» (4 выпуска в год). Подписной индекс по каталогу «Пресса России» 85343, на Интернет-сайте агентства «Книга-Сервис» — E85343 (по электронному каталогу можно подписаться и на текущие номера).

По вопросу приобретения ранее вышедших номеров журнала

По вопросу приобретения ранее вышедших номеров журнала обращаться по тел. 8-(844-2)-96-98-46 к отв. секретарю редсовета В.И. Воробьеву

Продолжается прием статей в очередные выпуски серий «Политематическая» и «Строительная информатика»

электронного сетевого научно-технического журнала «ИНТЕРНЕТ-ВЕСТНИК ВолгГАСУ». Журнал включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации,

в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук,

утвержденный ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия, свидетельство Эл № ФС77-26286 от 17.11.06, Международным центром ISSN, ISSN 1994-0351, перерегистрирован ФГУП НТЦ «Информрегистр», свидетельство № 594 от 20.10.11, номер гос. рег. 0421200065 (на 2012 г.), включен в базу РИНЦ (www.elibrary.ru).

Подробная информация на сайте журнала www.vestnik.vgasu.ru

«Интернет-вестник ВолгГАСУ» не является электронной версией печатного журнала. Оба журнала содержат оригинальные публикации.

> По вопросам публикации статей в научно-теоретическом журнале «СОЦИОЛОГИЯ ГОРОДА»

обращаться к гл. редактору Б.А. Навроцкому по тел. 8-8442-96-99-25.
Подписаться на журнал можно по каталогу «Пресса России», подписной индекс 29507 и по Интернет-каталогу на сайте агентства «Книга-Сервис», подписной индекс Е 29507.
Журнал включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук,

утвержденный ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации. Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия, свидетельство Эл № ФС77-26286 от 17.11.06, Международным центром ISSN, ISSN 1994-0351, включен в базу РИНЦ (www.elibrary.ru). Подробная информация о журнале на сайте ВолгГАСУ по адресу: www.vgasu.ru в разделе Наука / Научные журналы.

# Научное издание

# ВЕСТНИК ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Научно-теоретический и производственно-практический журнал

Серия: Строительство и архитектура 2014. Вып. 36 (55)

Редактор М. Л. Песчаная
Перевод на английский язык О.Ю. Юшко
Компьютерная правка и верстка Н. А. Кашириной, А. Г. Сиволобовой
Компьютерный дизайн обложки О. Ю. Мелешин
Информационно-библиографическое обслуживание выпуска Е. В. Хромова

Подписано в печать 05.06.2014. Формат 70 × 108/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Уч.-изд. л. 17,2. Усл. печ. л. 26,6. Тираж 500 экз. Заказ № 17

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет» Редакционно-издательский отдел Отдел оперативной полиграфии 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1