

Министерство образования и науки Российской Федерации

ВЕСТНИК
ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск **Серия: Строительство и архитектура**
40(59) Научно-теоретический и производственно-практический журнал **2015**

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

Выходит 4 раза в год
Основан в 1999 г.

Волгоград

ВолгГАСУ

С о д е р ж а н и е

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА,
ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

- Азаров В. Н., Мензелинцева Н. В., Карапузова Н. Ю., Фомина Е. О., Редван А. М.** Расчет вентиляционных выбросов цементных заводов 4
Колодяжный С. А., Кавыгин А. А. Оптимизация работы приточно-вытяжной установки с высокоэффективным пластинчатым рекуператором в циклическом режиме 18
Фокин В. М., Ковылин А. В., Попова А. В. Экспериментальное определение энергоэффективности и экологической безопасности оконного блока методом неразрушающего контроля 29

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

- Москвичева Е. В., Москвичева А. В., Игнаткина Д. О., Сидякин П. А., Щитов Д. В.** Кинетическая модель флотации с использованием смешанного реагента на основе отхода производства 45

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА

- Балакин В. В.** Принципы формирования объектов ландшафтно-средозащитного озеленения на городских дорогах и улицах 58
Прокопенко В. В., Ганжа О. А. К вопросу о методах оценки показателя комфортности ландшафтно-рекреационных территорий крупнейших городов (на примере города Волгограда) 73

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

- Богомолов А. Н., Павлов Д. В., Богомолова О. А., Анисимов Л. А.** Расчет устойчивости незакрепленной подземной выработки круглого сечения, расположенной в активной зоне заглубленного ленточного фундамента 89

Богомолов А. Н., Скибин Г. М., Олянский Ю. И., Махова С. И., Алексеев А. Ф., Галай Б. Ф. Оценка просадочности лессовых оснований полевыми и лабораторными методами	98
Пономарев А. Б., Золотозубов Д. Г. Улучшение свойств грунтовых оснований на карстоопасных территориях с помощью геосинтетического материала	116
СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ	
Алимова Л. А., Акчурин Т. К., Пушкарская О. Ю. Анализ механизма действия кремнеземсодержащей добавки на основе отходов металлургии в составах бетонных композиций	127
Голованова А. С., Акчурин Т. К., Пушкарская О. Ю. Системный подход к разработке составов многокомпонентных композиций на основе полимерных отходов	135
Душко О. В. Гидродинамический анализ условий диспергирования карбидкремниевой керамики в среде СОЖ	144
Душко О. В. Влияние термосиловых нагрузок на образование трещин при обработке высокотвердой керамики	155
Луговая В. А., Ярошик В. В. Особенности наплавки композиционных сплавов при упрочнении рабочих поверхностей тел вращения	166
Орешкин Д. В., Горностаева Е. Ю., Капцов П. В., Хаев Т. Э. Древесно-цементные композиции с улучшенными физико-механическими показателями	174
СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Беликов Г. И., Журбина Е. И., Алексиков С. В. Устойчивость тонких упругих подкрепленных пластинок в мостовых конструкциях	186
Чаускин А. Ю., Пшеничкина В. А. Математическое моделирование задач механики разрушения методом XFEM с учетом стохастической природы неоднородного материала	197
ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ	
Серова Е. Ю., Сапожкова Н. В. Оценка состояния организации движения транспорта на улично-дорожной сети Волгограда	208
Фоменко Н. А., Богданов В. И., Бурлаченко О. В., Алексиков С. В. Система защиты гидропривода строительного-дорожного машин	219

C o n t e n t

HEAT SUPPLY, VENTILATION, AIR CONDITIONING, GAS SUPPLY AND ILLUMINATION

- Azarov V. N., Menzelintseva N. V., Karapuzova N. Yu., Fomina E. O., Redvan A. M.** Calculation of ventilation emissions of cement plants 4
Kolodyazhnyi S. A., Kavygin A. A. Optimization of cyclical operation of air-handling unit with high-performance plate heat exchanger 18
Fokin V. M., Kovylin A. V., Popova A. V. Experimental determination of energy efficiency and ecological safety of the window block by method of nondestructive control 29

WATER SUPPLY, SEWERAGE, CONSTRUCTIONS FOR WATER RESOURCES PROTECTION

- Moskvicheva E. V., Moskvicheva A. V., Ignatkina D. O., Sidiyakin P. A., Shchitov D. V.** Kinetic model of flotation using a mixed reagent on the basis of production waste 45

ENVIRONMENTAL ISSUES IN URBAN PLANNING

- Balakin V. V.** Principles of arrangement of planted shelterbelts in urban streets and roads 58
Prokopenko V. V., Ganzha O. A. To the issue of assessment methods of comfort of landscape and recreation territories in large territories (by the example of Volgograd) 73

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

- Bogomolov A. N., Pavlov D. V., Bogomolova O. A., Anisimov L. A.** Calculation of stability of unfixed underground mine of circular section located in active zone of buried strip foundation 89
Bogomolov A. N., Skibin G. M., Olyanskii Yu. I., Makhova S. I., Alekseev A. F., Galai B. F. Assessment of subsidence of loess foundations by field and laboratory methods 98
Ponomarev A. B., Zolotozubov D. G. Improvement of properties of soil foundations in karst dangerous territories by means of geosynthetic materials 116

BUILDING MATERIALS AND ARTICLES

- Alimova L. A., Akchurin T. K., Pushkarskaya O. Yu.** Analysis of mechanism of siliceous additives based on waste ferroalloys as part of concrete composites 127
Golovanova A. S., Akchurin T. K., Pushkarskaya O. Yu. Systematic approach to the design of multi-component composites based on polymeric wastes 135
Dushko O. V. Hydrodynamic analysis of conditions of dispersion of silicon carbonate ceramics in cutting lubricant 144
Dushko O. V. Influence of thermal power loads on cracking when processing highly rigid ceramics 155
Lugovaya V. A., Yaroshik V. V. Peculiarities of facing of composite alloys at hardening of working surface of solid of rotation 166
Oreshkin D. V., Gornostaeva E. Yu., Kaptsov P. V., Khaev T. E. Wood-cement compositions with improved physical and technical properties 174

STRUCTURAL MECHANICS

- Belikov G. I., Zhurbina E. I., Aleksikov S. V.** Stability of thin reinforced elastic plates in bridge conduits 186
Chauskin A. Yu., Pshenichkina V. A. Mathematical modeling of fracture mechanics problems by XFEM method taking into account stochastic nature of inhomogeneous material 197

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

- Serova E. Yu., Sapozhkova N. V.** Assessment of the state of the traffic organization of the street and road network in Volgograd 208
Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V., Aleksikov S. V. Protection system of hydraulic drive of road-building machines 219

УДК 697.9

В. Н. Азаров, Н. В. Мензелинцева, Н. Ю. Карапузова, Е. О. Фомина, А. М. Редван

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

РАСЧЕТ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ ЦЕМЕНТНЫХ ЗАВОДОВ

Проектирование систем вентиляции и очистки вентиляционных выбросов цементных заводов не теряет своей актуальности ни в нашей стране, ни за рубежом. Для выбора эффективной системы вентиляции проведен анализ компонентного состава сырья, дисперсного состава пыли цементных производств. Разработана эффективная система очистки вентиляционных выбросов. Приведены рекомендации по нормализации пылевой обстановки в цехах цементных заводов.

Ключевые слова: вентиляционные выбросы, дисперсный состав, интенсивность пылеоседания, обеспыливание.

Одним из наиболее востребованных на рынке строительных материалов является цемент. В настоящее время среднее душевое потребление цемента в мире составляет 250 кг на человека в год. В ближайшие 50 лет ожидается увеличение выпуска цемента примерно в 5 раз [1]. Связано это с тем, что цементное производство считается одним из наиболее важных для развития экономики государства и становления промышленности строительных материалов.

Сыпучие материалы в виде сырья, полуфабрикатов и готовых изделий являются источниками загрязнения воздушной среды, причем выделяемая пыль загрязняет не только промплощадку, но и прилегающие территории, негативно влияя на окружающую среду и человека.

Особенно актуально загрязнение атмосферы твердыми частицами в странах, расположенных в степных, пустынных и полупустынных зонах, для которых характерно высокое фоновое загрязнение твердыми частицами. Суммарные выбросы твердых частиц в атмосферу системами вентиляции предприятий по производству цемента только в России в год составляют в среднем 20,8 млн т. В цементной промышленности Йемена при производстве 1 т цемента образуется 0,14 т пыли [2, 3].

Медицинские исследования подтверждают связь между уровнем загрязнения воздуха твердыми частицами пыли и проблемами здоровья [4], поскольку взвешенные частицы способны проникать в самые глубокие части легких и становиться причиной возникновения острых и хронических заболеваний дыхательных путей. Особенно актуальна эта проблема для людей, работающих на предприятиях строительной отрасли, так как для таких производств характерна повышенная запыленность воздуха пылью, что увеличивает риск возникновения профессиональных заболеваний работников [5—8].

В связи с растущей потребностью рынка строительных материалов в производстве цемента представляется интересным оценить пылевую обстановку на предприятиях отрасли, а также основные мировые тенденции развития пылеулавливающего оборудования при очистке вентиляционных выбросов цементного производства от твердых частиц.

Известно 4 основных технологических способа производства цемента: сухой, полусухой, полумокрый и мокрый способы¹. При сухом способе сырьевые материалы измельчают и в виде подвижного порошка сушат в сырьевой мельнице. Сухую сырьевую шихту используют для питания печи с циклонным теплообменником или кальцинатором или (реже) длинной сухой печи. При полусухом способе сухая сырьевая шихта гранулируется с водой и подается перед печью в колосниковый подогреватель или в длинную печь, оборудованную ячеевыми теплообменниками. При полумокром способе шлам предварительно обезвоживают фильтрацией. Образующийся на фильтре кек гранулируется методом экструзии и подается либо в колосниковый подогреватель, либо непосредственно в сушилку сырьевого кека для получения сырьевой шихты. При мокром способе сырьевые материалы (часто с высокой влажностью) измельчают в присутствии воды с образованием сырьевого шлама. Шлам подается либо непосредственно во вращающуюся печь, либо предварительно в сушилку шлама.

Выбор способа производства в значительной степени зависит от состояния сырьевых материалов, но очевидно, что мокрый способ производства является более энергозатратным и, следовательно, более дорогостоящим.

Так как в экономике любого государства энергосберегающие технологии все больше становятся приоритетными, на цементных заводах модернизируются производственные линии и переводятся на сухой способ производства с использованием современных энергосберегающих мероприятий. Например, в России на некоторых крупнейших предприятиях модернизированы линии по изготовлению цементного клинкера с переводом технологии производства на сухой способ.

Такая же тенденция в технологии производства цемента отмечается и в других странах, например в Республике Йемен. Так, современный завод «Амран» в г. Амран производительностью 500 тыс. т/г полностью работает по сухому способу производства.

Уровень запыленности воздуха рабочих зон при сухом способе производства цемента несколько выше, чем при мокром, поэтому при выборе и проведении оценки работы систем вентиляции необходимо знание физико-химических свойств сырья и дисперсного состава образующейся пыли. В табл. представлены результаты среднестатистических анализов состава сырья, используемого для производства портландцемента в России и Йемене [9, 10].

Известны различные методы определения дисперсного состава пыли, среди которых наиболее часто используемые ситовый, седиментометрические методы [11], однако наиболее точным является метод микроскопии.

Разработана методика исследования дисперсности пыли методом микроскопии [12]. Данная методика предназначена для измерений величины пылевидных частиц путем разностороннего фотографирования через микрофотоприставку образцов, увеличенных под микроскопом в 200...2000 раз, и дальнейшего расчета дисперсионного состава пыли, выделяющейся в атмосферный воздух и воздух рабочей зоны от технологических процессов в

¹ ГОСТ Р 54194-2010. Ресурсосбережение. Производство цемента. Наилучшие доступные технологии повышения энергоэффективности.

промышленности, организованных и неорганизованных источников выбросов. Количество необходимых фотографий зависит от дисперсности (раздробленности) пыли. Снятие изображения с фотоаппарата и последующая обработка производится с помощью графического пакета Adobe PhotoShop для сохранения изображения в черно-белом режиме. Дальнейший расчет дисперсного состава пыли включает в себя выявление содержания частиц определенной фракции пыли в ее общей совокупности. С помощью компьютерной программы SPOTEXPLORER, позволяющей производить цифровую обработку черно-белых изображений, по площади, занимаемой пылевидной частицей, рассчитывается ее эквивалентный диаметр и определяется количество частиц различного размера. Полученные результаты удобно представлять в виде интегральных кривых распределения массы частиц по диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке.

Компонентный состав сырья, используемого в производстве цемента

Материал	Потери при прокаливании, %	Содержание, %					
		CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃
Россия							
Известняк	40,88	51,8	0,76	4,82	0,53	0,34	—
Песчаник	13,85	15,86	0,76	62,29	3,05	1,45	0,09
Железная Руда	3,0	0,2	0,2	7,8	4,5	84,0	—
Йемен							
Известняк	42,57	54,31	0,06	0,81	0,15	0,12	0,27
Песчаник	2,14	0,92	0,85	92,01	1,17	0,93	0,44
Железная руда	1,74	1,84	0,09	0,73	1,49	95,78	0,95

Для определения дисперсного состава цементной пыли в воздухе рабочих зон предприятий отрасли проводился отбор проб пыли на заводах по производству цемента в России и Республике Йемен. Пробы были взяты на различных этапах производства: на участке у вращающейся печи, у мельниц, в цехе упаковки готовой продукции. По данным, полученным на предприятиях отрасли в России и Республике Йемен, построены интегральные кривые распределения массы частиц пыли по диаметрам (рис. 1—4).

На основании результатов проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод о том, что на предприятиях по производству цемента в России и Республике Йемен доля частиц пыли с диаметром 10 мкм составляет в различных рабочих зонах цехов от 45 до 100 %, а с диаметром 2,5 мкм и менее — от 0,5 до 17 %. Таким образом, можем сделать вывод о том, что в рабочих зонах цехов цементных заводов России и Йемена преобладает мелкодисперсная пыль с диаметром менее 10 мкм.

Теоретический анализ осаждения частиц пыли в воздухе рабочей зоны показал, что частицы перемещаются неоднородно и аperiодично как в пространстве, так и во времени [13].

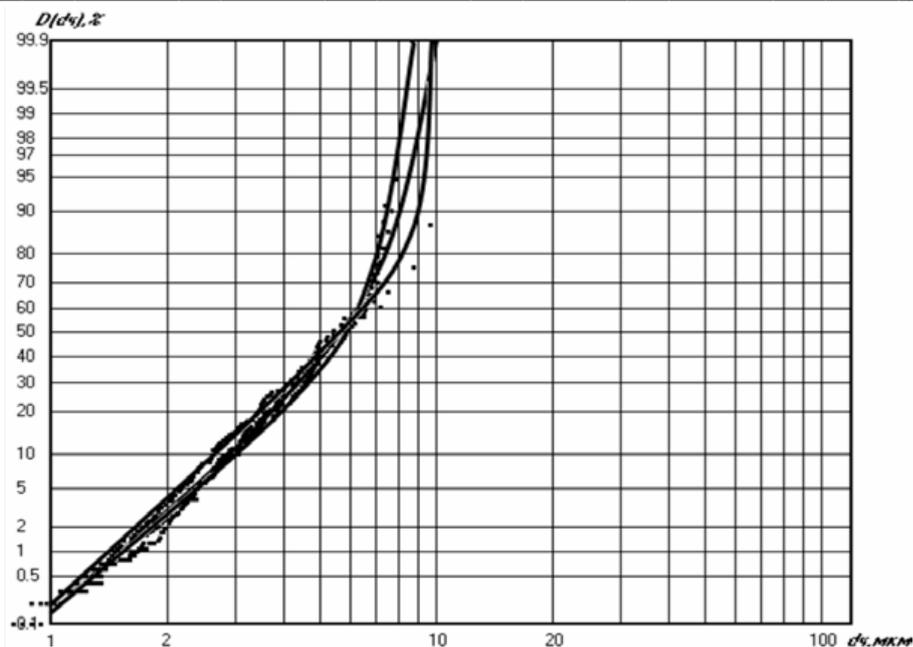


Рис. 1. Интегральные кривые распределения массы частиц по диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке для пыли, отобранной в рабочей зоне цеха обжига. Россия. PM_{10} — 100 %, $PM_{2.5}$ — до 14 %

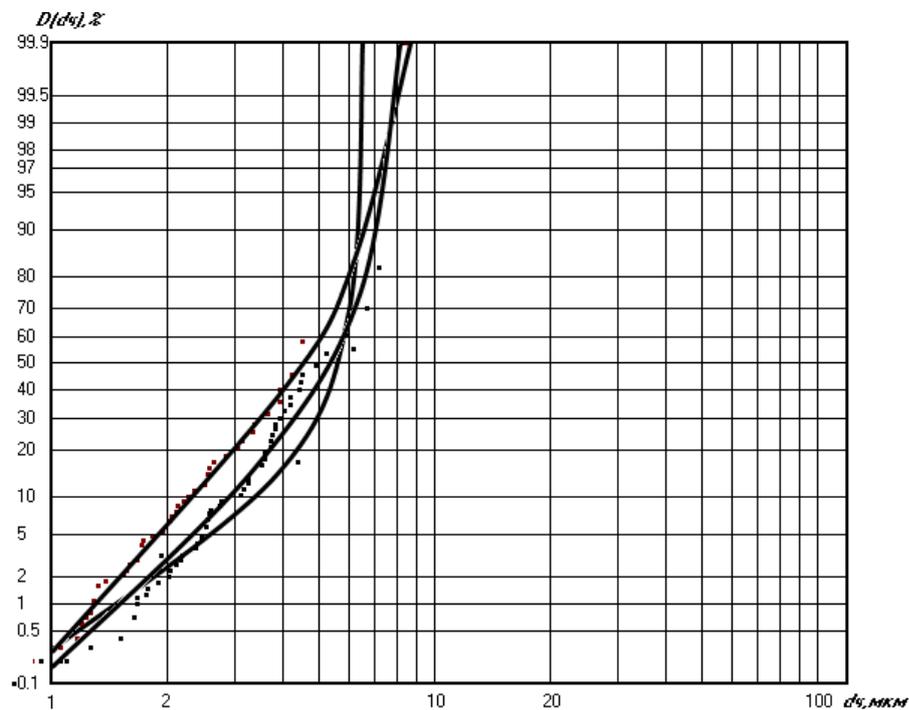


Рис. 2. Интегральные кривые распределения массы частиц по диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке для пыли отобранной в рабочей зоне цеха упаковки. Россия. PM_{10} — 100 %, $PM_{2.5}$ — от 6 до 17 %

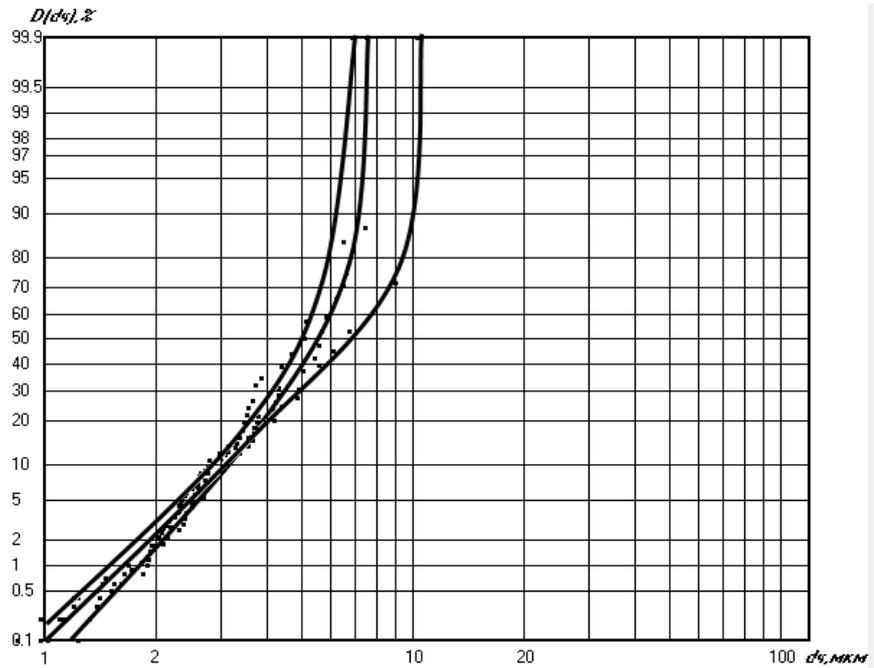


Рис. 3. Интегральные кривые распределения массы частиц по диаметрам для пыли, выделяющейся в воздух рабочей зоны при упаковке цемента. Ймен. PM_{10} — 100 %, $PM_{2.5}$ — от 5 до 9 %

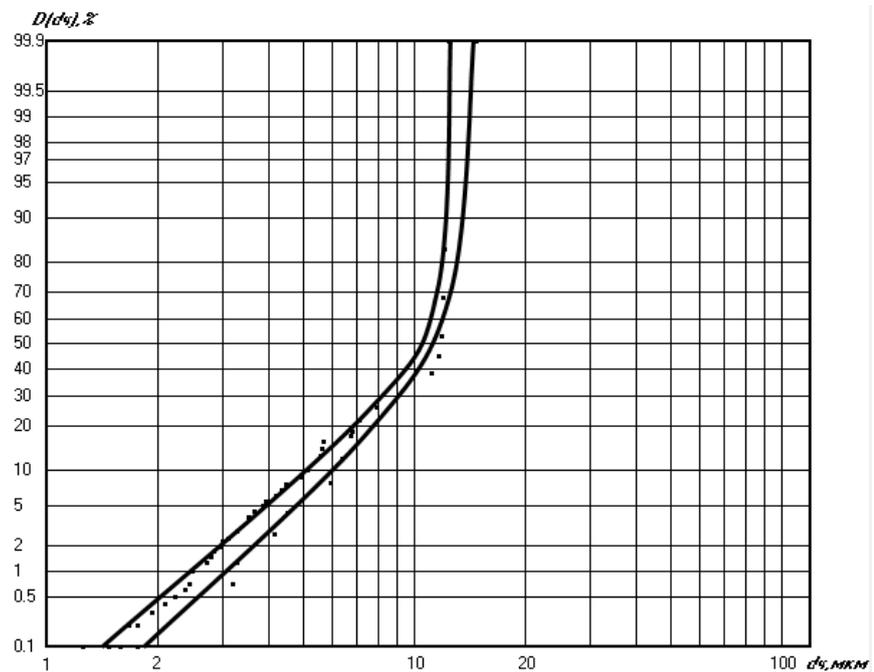


Рис. 4. Интегральные кривые распределения массы частиц по диаметрам для пыли, выделяющейся в воздух рабочей зоны при подготовке смеси. Ймен. PM_{10} — до 45 %, $PM_{2.5}$ — до 1 %

Уравнение движения частиц пыли можно записать в следующем виде:

$$m \frac{d\vec{U}}{dt} = mg + 6\pi\rho_a\nu R(\vec{W} - \vec{U}), \quad (1)$$

где m — масса частицы; $\vec{U}(\vec{r}, t)$ — вектор скорости пылинки; ρ_a — плотность воздуха; ν — его кинематическая вязкость; R — эффективный радиус пылинки; $\vec{W}(\vec{r}, t)$ — вектор скорости воздушного потока.

Уравнение (1) по компонентам можно представить в виде:

$$\frac{du}{dt} = A[W_0(1 + \Delta_x \cos(\omega_x t + \varphi_x)) - u], \quad (2)$$

$$\frac{dw}{dt} = -g + A[W_0\Delta_z \cos(\omega_z t + \varphi_z) - w], \quad (3)$$

$$A = \frac{18\rho_b\nu}{4\rho_d R^2},$$

где $\Delta_{x,z}$ — параметры, определяющие относительные амплитуды пульсации; $\omega_{x,z}$, $\varphi_{x,z}$ — частоты и фазы соответственно.

Численное интегрирование системы дифференциальных уравнений (2), (3) проводили методом Рунге — Кутты 4-го порядка [14].

На рис. 5 приведены расчетные траектории движения частиц пыли различного диаметра в плоскости xz в зависимости от следующих параметров задачи: $W_0 = 0,3$ м/с; $\Delta_x = 0,4$; $\Delta_z = 0,1$; $\omega_x = 0,1$ Гц; $\omega_z = 0,04$ Гц; $\rho_d = 2,8$ г/м³.

Анализ представленных на рис. 5 траекторий движения пылевых частиц показал, что мелкодисперсная пыль с диаметрами частиц менее 20 мкм находится в воздухе рабочей зоны длительное время, тем самым повышая опасность негативного воздействия на организм работников даже при незначительной концентрации взвешенных частиц в воздухе рабочей зоны.

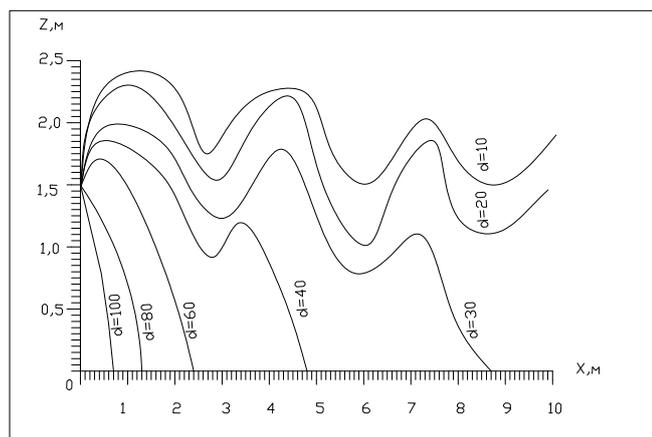


Рис. 5. Расчетные траектории оседания частиц пыли плотностью $\rho_d = 2,8$ г/м³ различного диаметра с высоты 1,5 м

Для комплексной оценки пылевой обстановки на предприятиях профессора В. Н. Азаров и Е. И. Богуславский предложили использовать не только концентрацию пыли в воздухе рабочей зоны, но и плотность пылеоседания на участках производства.

Замеры концентрации пыли в воздухе рабочей зоны проводились по стандартным методикам, принятым в РФ². По результатам замеров были построены зависимости осредненной концентрации цементной пыли в воздухе рабочих зон на различных участках производства. На рис. 6 представлена зависимость изменения осредненной концентрации пыли для цеха упаковки цемента, источник пылевых выделений — карусельная упаковочная машина.

Изменение концентрации цементной пыли на удалении x от технологического оборудования с вероятностью $P=0,95$ может быть описано выражением

$$c = a \exp^{-bx}, \quad (4)$$

где a, b — коэффициенты, полученные экспериментально; x — расстояние от источника пылевых выделений.

Для рабочей зоны оператора карусельной машины цеха упаковки уравнение имеет вид:

$$c = 13,21e^{-0,184x}. \quad (5)$$

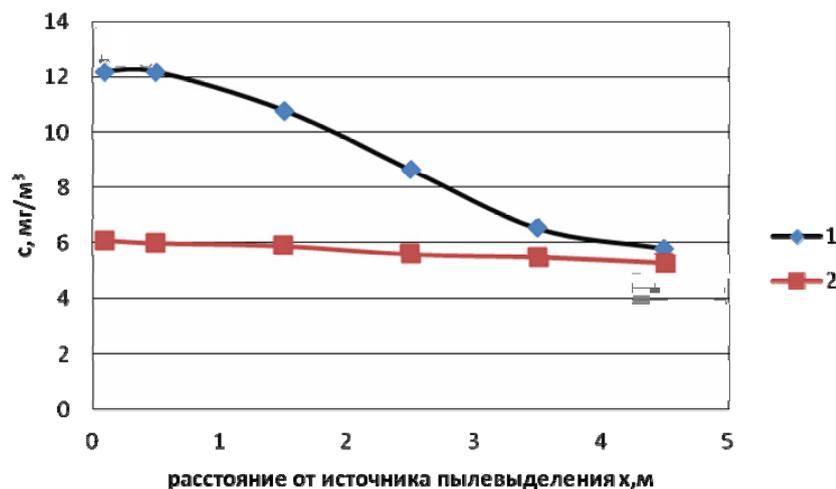


Рис. 6. Изменение осредненной величины концентрации цементной пыли в $мг/м³$: 1 — до внедрения предложенной установки, 2 — после внедрения предложенной установки

На основании полученных данных можно отметить, что на расстоянии до 0,5 м от источника пылевых выделений наблюдается максимальная запыленность воздуха рабочей зоны, которая превышает допустимое значение ПДК.

² Методика определения концентрации пыли в промышленных выбросах (эмиссия). М. : НИИОГАЗ, 1970. 32 с.

ГОСТ Р 517721-2001. Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. Определение запыленности газовых потоков. Введ. 1996-07.01. М., 1996.

Для оценки закономерностей распространения пыли и определения количества пыли, выбивающейся от технологического оборудования $M_{т.о.}$, была определена суммарная величина пылевыведений в цех M , г/ч, по методике профессоров Е. И. Богуславского и В. Н. Азарова [15, 16], согласно которой:

$$M = M_1 + M_2 + M_3, \quad (6)$$

где M_1 — количество пыли, уносимой вентиляционными и аспирационными системами, г/ч; M_2 — количество пыли, уносимой через проемы помещения, г/ч; M_3 — количество пыли, оседающей на пол и технологические площадки цеха, г/ч.

Методика определения двух первых слагаемых формулы (6) известна. Количество пыли, оседающей на технологических площадках и полу цеха, определяется путем замеров интенсивности пылеоседания. Данная методика позволяет с инженерной точностью определять количество пыли, выбивающейся из оборудования, при величине плотности пыли, осаждающейся на поверхности пола и технологических площадках, в пределах $0,1 \dots 100$ г/(м²·ч) [15, 16].

Чтобы посчитать интенсивность пылеоседания на поверхность пола производственного помещения на расстоянии $1,5 \dots 2$ м от источника пыления, по окружности через угол $\pi/4$ расставляются тарелочки-ловушки, на которых осаждается пыль.

Осевшая пыль взвешивается, и определяется интенсивность пылеоседания по формуле

$$G_0 = G/F\tau, \quad (7)$$

где G — количество пыли, осевшей на тарелочке, кг; F — площадь тарелочки, м².

По полученным результатам выбирают максимальные и минимальные значения плотности пылеоседания G_{\max} и G_{\min} соответственно. Через значения G_{\min} и G_{\max} проводят линию, которая является средней линией для зоны пылеоседания фиксированного источника пыления. Зону пылеоседания фиксированного источника делят на два сектора с углом раскрытия $\pi/4$, то есть получают по два сектора с минимальным и максимальным оседанием пыли. Затем проводят основные замеры, в результате которых определяют количество пыли, выбивающейся из оборудования. Время нахождения ловушек в зоне оседания не менее трех часов.

По результатам проведенных экспериментальных исследований построен график зависимости значений плотности пылеоседания от расстояния от источника пылевыведений, представленный на рис. 7.

Изменение плотности пылеоседания G_0 на удалении x от технологического оборудования описывается выражением

$$G = t \exp^{-nx},$$

где t, n — коэффициенты, полученные экспериментально; x — расстояние от источника пылевыведения.

Для рабочей зоны оператора карусельной машины цеха упаковки уравнение имеет вид

$$G = 116,1 e^{-0,16x}. \quad (8)$$

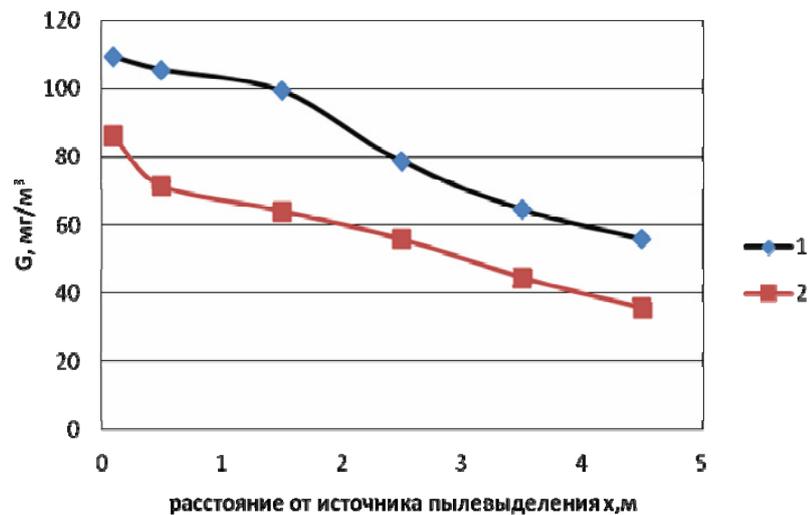


Рис. 7. Изменение плотности пылеоседания G_0 на удалении x от технологического оборудования: 1 — до внедрения предложенной установки, 2 — после внедрения предложенной установки

На рис. 8 представлена зависимость осредненной концентрации пыли от плотности пылеоседания для цеха упаковки.

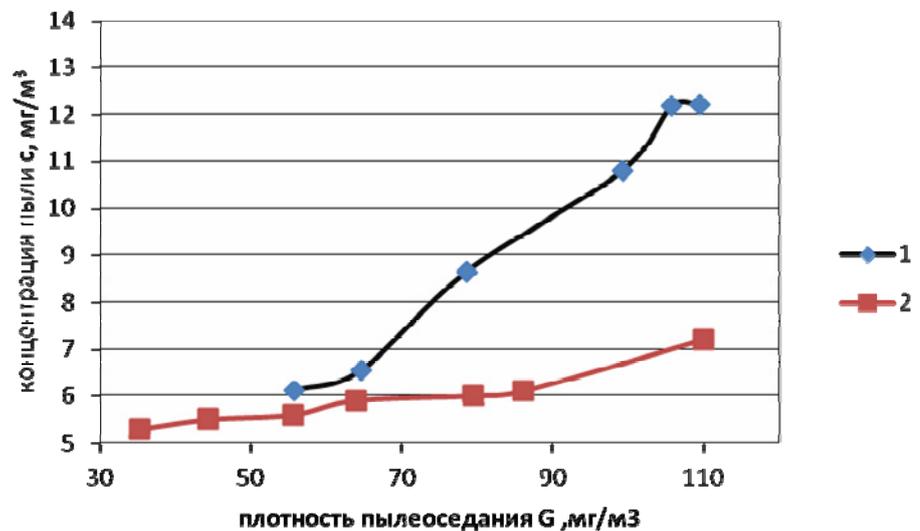


Рис. 8. Зависимость концентрации пыли от плотности пылеоседания: 1 — до внедрения предложенной установки, 2 — после внедрения предложенной установки

Данная зависимость аппроксимируется выражением

$$c = k \exp^{pG},$$

где k, p — коэффициенты, полученные экспериментально.

Для рабочей зоны оператора карусельной машины цеха упаковки уравнение имеет вид:

$$c = 2,8357 \exp^{0,0136G} \quad (9)$$

Исходя из зависимостей (5), (8), (9) получим выражение

$$c = G_0 \cdot 0,1475e^{-0,184x} \quad (10)$$

где G_0 — экспериментальное значение плотности пылеоседания на расстоянии 1 м от источника пылевыведений.

На основании полученных зависимостей можно проводить оценку запыленности рабочей зоны через пылеоседание с использованием методики Азарова — Богуславского и разрабатывать эффективную организацию воздухообмена системами вентиляции.

Для улучшения пылевой обстановки в воздухе рабочих зон предприятий по производству цемента и снижения риска возникновения профессиональных заболеваний была разработана установка для очистки от пылевыведений технологического оборудования. Установка использует на первой ступени очистки аппарат ВЗП, а на второй — рукавный фильтр. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 9.

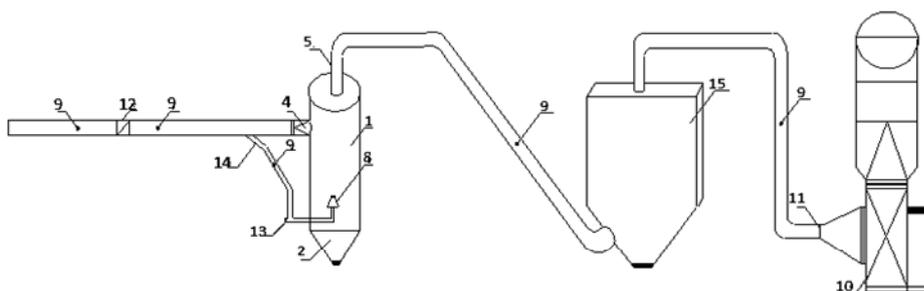


Рис. 9. Схема экспериментальной установки: 1 — аппарат ВЗП; 2 — пылевой бункер; 3 — верхний тангенциальный входной патрубок; 4 — тангенциальный вход; 5 — верхний выходной осевой патрубок; 6 — нижний входной патрубок; 7 — V-образный рассекающий элемент; 8 — отбойная шайба; 9 — штупцер для проведения замеров; 10 — вентилятор; 11 — шибер; 12 — заслонка; 13 — тангенциальный завихритель нижнего патрубка; 14 — заслонка; 15 — рукавный фильтр

При проведении исследований эффективности улавливания вихревого инерционного аппарата со встречными закрученными потоками в качестве варьируемых факторов были выбраны: $L_{\text{общ}}$ — общий расход газа в системе, $\text{м}^3/\text{ч}$; $L_{\text{ни}}/L_{\text{общ}}$ — доля расхода газа, подаваемого в аппарат через нижний ввод; \bar{C}_0 — относительная концентрация поступающей на очистку пыли, отнесенная к $1 \text{ г}/\text{м}^3$.

Оценка эффективности улавливания производилась на основании сопоставления масс пыли поступающей и выходящей, которые определялись путем отбора проб и измерений в замерных сечениях воздухопроводов. Для измерения запыленности использовался стандартный комплект пылезаборного оборудования. Отбор проб осуществлялся одновременно во всех замерных сечениях,

этим обеспечивалась идентичность отбора проб в каждом из сечений режиму работы системы и поступления пыли.

Результаты эффективности улавливания цементной пыли аппаратом ВЗП представлены на рис. 10.

Результаты показали, что при использовании аппарата ВЗП можно повысить эффективность первой ступени очистки обеспыливающих систем до 80 %, что должно значительно снизить нагрузку по пыли рукавного фильтра, а также повысить эффективность и надежность работы установки в целом. Для этого были проведены сравнительные испытания установки (рис. 10) без аппарата ВЗП и с ним. Эффективность улавливания всей установки увеличилась с 99 до 99,9 %.

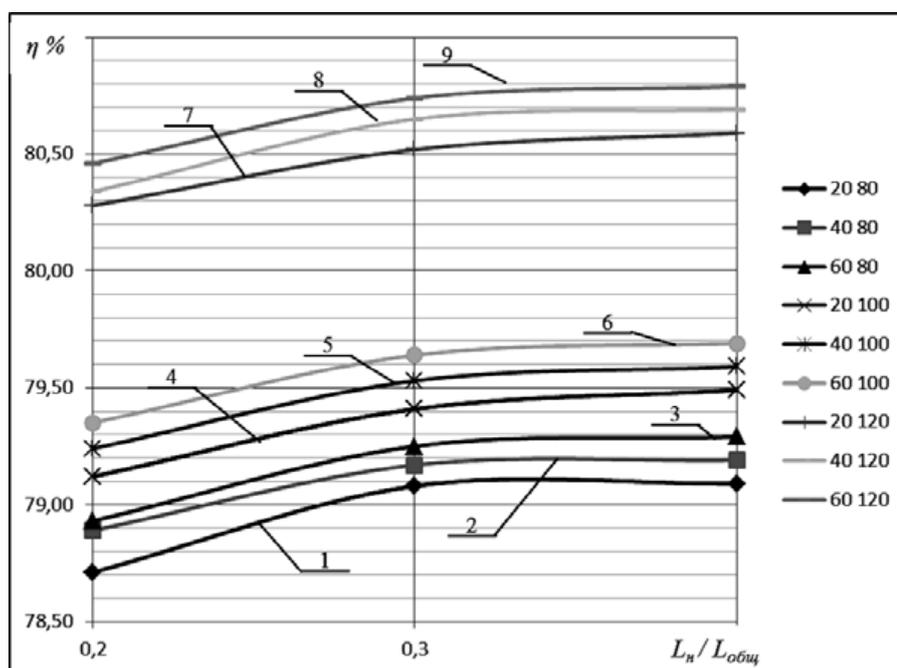


Рис. 10. Экспериментальные зависимости эффективности улавливания цементной пыли аппаратом ВЗП 150 с длиной патрубка нижнего ввода $L = 300$ мм при:

$L_{общ} = 80$: 1 — $\bar{C} = 20$; 2 — $\bar{C} = 40$; 3 — $\bar{C} = 60$;
 $L_{общ} = 100$: 4 — $\bar{C} = 20$; 5 — $\bar{C} = 40$; 6 — $\bar{C} = 60$;
 $L_{общ} = 120$: 7 — $\bar{C} = 20$; 8 — $\bar{C} = 40$; 9 — $\bar{C} = 60$

Следует также отметить, что для снижения уровня запыленности рабочих зон и прилегающих к предприятиям территорий необходимо на предприятиях отрасли проводить совершенствование конструкций систем аспирации, обеспечивать требуемую интенсивность местных отсосов, герметизировать оборудование, разрабатывать и внедрять системы автоматизации средств локализации пылевыведений от оборудования, способных эффективно работать в условиях нестационарных процессов. С целью снижения повторного взмета цементной пыли с поверхности пола помещений цеха необходимо разрабатывать и внедрять эффективную систему пневмоуборки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аль Моғалис Ахмед Абдольджалил Мухамед. Исследование и обоснование комплекса мероприятий по экологизации цементного производства Йемена: автореф. дис... канд. техн. наук. М., 2000. 16 с.
2. National Environmental Management: Air Quality Act (39/2004) — List of activities which result in atmospheric emissions which have or may have a significant detrimental effect on the environment, including health, social, economic, ecological conditions. URL: <http://www.environment.co.za/environmental-laws-and-legislation-in-south-africa/south-africa-national-environmental-management-air-quality-act-392004-list-of-activities-which-result-in-atmospheric-emissions-which-have-significant-detrimental-effect-on-the-environment-including-he.html>
3. Полонский В. М. Охрана воздушного бассейна заводов строительной индустрии: учеб. пособие. Самара, 2006. 200 с.
4. Meo SA. Health hazards of cement dust // Saudi Med. J. 2004. 25(9). Pp. 1153—1159.
5. Clusters of pneumoconiosis among residents near cement factories / Leem JH, Cho JH, Lee EC, Kim JH, Lee DH, Lee SJ, Lee JY, Kim HC // Korean J. Occup. Environ. Med. 2010. 22(2). Pp. 140—145.
6. Exposure to cement dust, related occupational groups and laryngeal cancer risk: Results of a population based case-control study / A. Dietz, H. Ramroth, T. Urban, W. Ahrens, H. Becher // Int. J. of Cancer. 2004. 108(6). Pp. 907—111. DOI: 10.1002/ijc.11658
7. Al-Neaimi Y. I., Gomes J., Lloyd O. L. Respiratory illnesses and ventilator function among workers at a cement Factory in a rapidly developing country // Occupational Medicine. 2001. 51(6). Pp. 367—373. doi: 10.1093/occmed/51.6.367
8. Cement dust exposure and ventilatory function impairment: an exposure-response study / J. Mwaiselage, M. Bratveit, B. Moen, Yo. Mashalla // Journal of Occupational & Environmental Medicine. 2004. 46(7). Pp. 658—667.
9. Van Oss H., Padovani A. C. Cement manufacture and the environment. Part 1. Chemistry and technology // Journal of Industrial Ecology. 2002. 6(1). Pp. 89—105. DOI: 10.1162/108819802320971650
10. Properties of cement kiln dust concrete / M. Maslehuddin, O. S. B. Al-Amoudi, M. K. Rahman, M. R. Ali, M. S. Barry // Construction and Building Materials. 2009. 23(6). Pp. 2357—2361.
11. Коузов П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Л.: Химия, 1987. 265 с.
12. Азаров В. Н., Ковалева А. В., Сергина Н. М. Дисперсный анализ методом микроскопии с применением ПЭВМ // Экологическая безопасность и экономика городских и теплоэнергетических комплексов: междунар. науч.-практ. конф. Волгоград, 1999. С. 76—80.
13. Медников Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1981. 176 с.
14. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984. 832 с.
15. Азаров В. Н. Оценка пылевыделения от технологического оборудования // Безопасность труда в промышленности. 2003. № 7. С. 45—46.
16. Азаров В. Н. Комплексная оценка пылевой обстановки и разработка мер по снижению запыленности воздушной среды промышленных предприятий: автореф. дис... д-ра техн. наук. Ростов н/Д, 2004. 47 с.

© Азаров В. Н., Мензелинцева Н. В., Карапузова Н. Ю., Фомина Е. О., Редван А. М., 2015

Поступила в редакцию
в марте 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Расчет вентиляционных выбросов цементных заводов / В. Н. Азаров, Н. В. Мензелинцева, Н. Ю. Карапузова, Е. О. Фомина, А. М. Редван // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 40(59). С. 4—17.

Об авторах:

Азаров Валерий Николаевич — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой безопасности жизнедеятельности в техносфере, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, ptb2006@mail.ru

Мензелинцева Надежда Васильевна — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой инженерной графики, стандартизации и метрологии, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, menzelintseva_nv@mail.ru

Карпузова Наталья Юрьевна — канд. техн. наук, доц., Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, karapuzova-ny@mail.ru

Фомина Екатерина Олеговна — аспирант кафедры безопасности жизнедеятельности в техносфере, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Редван Авадх Мохаммед — аспирант кафедры безопасности жизнедеятельности в техносфере, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, awadhredwan_87@mail.ru

V. N. Azarov, N. V. Menzelintseva, N. Yu. Karapuzova, E. O. Fomina, A. M. Redvan

CALCULATION OF VENTILATION EMISSIONS OF CEMENT PLANTS

The design of systems of ventilation and purification of ventilation emissions of cement plants has not lost its relevance either in our country or abroad. To select an effective ventilation system the analysis of the component composition of raw materials, dust dispersed composition of cement production is carried out. An effective system of purification of ventilation emissions is worked out. The recommendations for the normalization of dust condition in workshops of cement plants are provided.

Key words: ventilation emissions, dispersed composition, intensity of dust deposition, dedusting.

REFERENCES

1. Al' Mogalis Akhmed Abdol'dzhalil Mukhammed. *Issledovanie i obosnovanie kompleksa meropriyatii po ekologizatsii tsementnogo proizvodstva Iemena* [Research and grounds of a complex of campaigns on environmentalization of cement production in Yemen. Diss. Cand. Eng. Sci.]. Moscow, 2000. 16 p.
2. *National Environmental Management: Air Quality Act (39/2004) — List of activities which result in atmospheric emissions which have or may have a significant detrimental effect on the environment, including health, social, economic, ecological conditions.* URL: <http://www.environment.co.za/environmental-laws-and-legislation-in-south-africa/south-africa-national-environmental-management-air-quality-act-392004-list-of-activities-which-result-in-atmospheric-emissions-which-have-significant-detrimental-effect-on-the-environment-including-he.html>
3. Polonskii V. M. *Okhrana vozdušnogo basseina zavodov stroitel'noi industrii: uchebnoe posobie* [Protection of the air basin of plants of the construction industry: study guide]. Samara, 2006. 200 p.
4. Meo SA. Health hazards of cement dust. *Saudi Med. J.*, 2004, 25(9), pp. 1153—1159.
5. Leem JH, Cho JH, Lee EC, Kim JH, Lee DH, Lee SJ, Lee JY, Kim HC. Clusters of pneumoconiosis among residents near cement factories. *Korean J. Occup Environ. Med.*, 2010, 22(2), pp. 140—145.
6. Dietz A., Ramroth H., Urban T., Ahrens W., Becher H. Exposure to cement dust, related occupational groups and laryngeal cancer risk: Results of a population based case-control study. *Int. J. of Cancer*, 2004, 108(6), pp. 907—111. DOI: 10.1002/ijc.11658
7. Al-Neaimi Y. I., Gomes J., Lloyd O. L. Respiratory illnesses and ventilator function among workers at a cement factory in a rapidly developing country. *Occupational Medicine*, 2001, 51(6), pp. 367—373. doi: 10.1093/occmed/51.6.367
8. Mwaiselage J., Bratveit M., Moen B., Mashalla Yo. Cement dust exposure and ventilatory function impairment: an exposure-response study. *Journal of Occupational & Environmental Medicine*, 2004, 46(7), pp. 658—667.
9. Hendrik G. van Oss, Amy C. Padovani. Cement Manufacture and the Environment: Part I: Chemistry and Technology. *Journal of Industrial Ecology*, 2002, 6(1), pp. 89—105. DOI: 10.1162/108819802320971650

10. Maslehuddin M., Al-Amoudi O. S. B., Rahman M. K., Ali M. R., Barry M. S. Properties of cement kiln dust concrete. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(6), pp. 2357—2361.
11. Kouzov P. A. *Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pylei i izmel'chennykh materialov* [Principals of the analysis of disperse structure of industrial dust and powdered materials]. Leningrad, Khimiya Publ., 1987. 265 p.
12. Azarov V. N., Kovaleva A. V., Sergina N. M. [Disperse analysis by the microscopic technique with the use of PC]. *Ekologicheskaya bezopasnost' i ekonomika gorodskikh i teploenergeticheskikh kompleksov* [Environmental safety and economy of city and heat and power complexes. Proc. of Int. Conf.]. Volgograd, 1999. Pp. 76—80.
13. Mednikov E. P. *Turbulentnyi perenos i osazhdenie aerozolei* [Turbulent exchange and aerosol disposition]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 176 p.
14. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Reference book on mathematics for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 832 p.
15. Azarov V. N. [Assessment of dust emission from processing equipment]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Industry labour safety requirements], 2003, no. 7, pp. 45—46.
16. Azarov V. N. *Kompleksnaya otsenka pylevoi obstanovki i razrabotka mer po snizheniyu zapylennosti vozdukhnoi sredy promyshlennykh predpriyatii : avtoref. dis... d-ra tekhn. nauk* [Complex assessment of the dust situation and the development of measures to decrease dust content in the air environment of industrial enterprises. Diss. Dr. Eng. Sci.]. Roston-on-Don, 2004. 47 c.

For citation:

Azarov V. N., Menzelintseva N. V., Karapuzova N. Yu., Fomina E. O., Redvan A. M. [Calculation of ventilation emissions of cement plants]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 40(59), pp. 4—17.

About authors:

Azarov Valerii Nikolaevich — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Life Safety in Technosphere Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, ptb2006@mail.ru

Menzelintseva Nadezhda Vasil'evna — Doctor of Engineering Science, Professor, Head of Engineering Graphics, Standardization and Metrology Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, menzelintseva_nv@mail.ru

Karapuzova Natal'ya Yur'evna — Candidate of Engineering Science, Docent, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, karapuzova-ny@mail.ru

Fomina Ekaterina Olegovna — Postgraduate student of Life Safety in Technosphere Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

Redvan Avadkh Mokhammed — Postgraduate student of Life Safety in Technosphere Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, awadhredwan_87@mail.ru

УДК 697.971

С. А. Колодяжный, А. А. Кавыгин

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

**ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ПРИТОЧНО-ВЫТЯЖНОЙ УСТАНОВКИ
С ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫМ ПЛАСТИНЧАТЫМ РЕКУПЕРАТОРОМ
В ЦИКЛИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ**

Разработан новый метод эксплуатации высокоэффективного перекрестно-противоточного рекуператора в условиях обмерзания, при котором приточно-вытяжная установка эксплуатируется в циклическом режиме. Конструкция установки исключает возможность смешения потоков воздуха в каждом режиме. Проведена серия экспериментов, в ходе которых происходило обмерзание и оттаивание рекуператора. В результате анализа результатов экспериментов разработана методика расчета оптимального значения времени длительности цикла в зависимости от различных условий. Конструкция установки защищена патентом. Предложенный метод обладает научной новизной и является перспективным. Методика определения оптимальной длительности циклов позволяет определять алгоритм работы приточно-вытяжной установки, используемый для системы автоматического управления.

К л ю ч е в ы е с л о в а: рекуператор, обмерзание, методика, расчет, теплоутилизация.

Введение. На сегодняшний день наиболее эффективным способом утилизации теплоты вытяжного воздуха является применение перекрестно-противоточного рекуператора, эффективность которого достигает 90 %. При эксплуатации данного устройства возникает явление обмерзания пластин рекуператора, что создает дополнительное аэродинамическое сопротивление и уменьшает эффективность теплообмена. Данная проблема может решаться различными способами, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Условно эти способы можно разделить на две группы:

- 1) решения, предполагающие эксплуатацию приточно-вытяжной установки в режиме обмерзания;
- 2) решения, предполагающие остановку системы вентиляции для организации процесса оттаивания рекуператора.

На сегодняшний день при производстве приточно-вытяжных установок наиболее частым решением проблемы обмерзания является устройство обводного канала, позволяющего приточному воздуху двигаться минуя рекуператор. Кроме того, современные алгоритмы системы автоматики указанных контроллеров предполагают плавное открытие байпаса для поддержания температуры вытяжного воздуха после рекуператора не ниже заданной. Как привило, заданная температура равна 5 °С, но алгоритм автоматики предусматривает возможность изменения данной температуры в ходе пусконаладочных работ. Описанный способ представлен в [1]. Недостатком этого способа является ограничение максимальной эффективности рекуператора. К первой группе способов также относится применение конструкции установки, описанной в [2], где проблема обмерзания решается путем установки дополнительного нагревателя перед рекуперативным теплоутилизатором. Данная система достаточно надежна, однако применение предварительного нагрева значительно снижает эффективность рекуперации. Применение рас-

смотренных выше способов не имеет смысла при использовании высокоэффективных пластинчатых теплоутилизаторов, так как эти способы предполагают ограничение эффективности работы теплоутилизатора.

Для высокоэффективных пластинчатых теплоутилизаторов применяются способы, которые позволяют рекуператору работать в режиме максимальной эффективности, но предусматривают остановку системы вентиляции для оттаивания. Наиболее современный способ представлен в [3], где предложена приточно-вытяжная установка, в которой в режиме оттаивания открывается воздушный клапан и вытяжной воздух после выхода из рекуператора направляется в зону входа приточного воздуха в рекуператор, после чего обратно в обслуживаемое помещение. Приточный вентилятор в этот момент отключен. Оттаивание происходит относительно быстро, так как пластины рекуператора с обеих сторон омываются теплым воздухом, однако данный способ неприемлем в проектных решениях, где недопустима рециркуляция. Решение проблемы обмерзания путем организации рециркуляции приводится и в [4].

Таким образом, на данный момент проблема эксплуатации высокоэффективных пластинчатых теплоутилизаторов в режиме обмерзания не решена. Существующие способы имеют значительные недостатки. Высокоэффективные пластинчатые рекуператоры являются на данный момент времени наиболее перспективным способом утилизации теплоты вытяжного воздуха, что обусловило необходимость разработки нового метода эксплуатации приточно-вытяжной установки в режиме обмерзания.

Описание изобретения. Авторами данной статьи предложена конструкция приточно-вытяжной установки, которая позволяет решать проблему обмерзания рекуператора путем его эксплуатации в циклическом режиме: обмерзание/оттаивание. Конструкция установки защищена патентом на полезную модель [5] и патентом на изобретение [6]. Схема установки представлена на рис. 1.

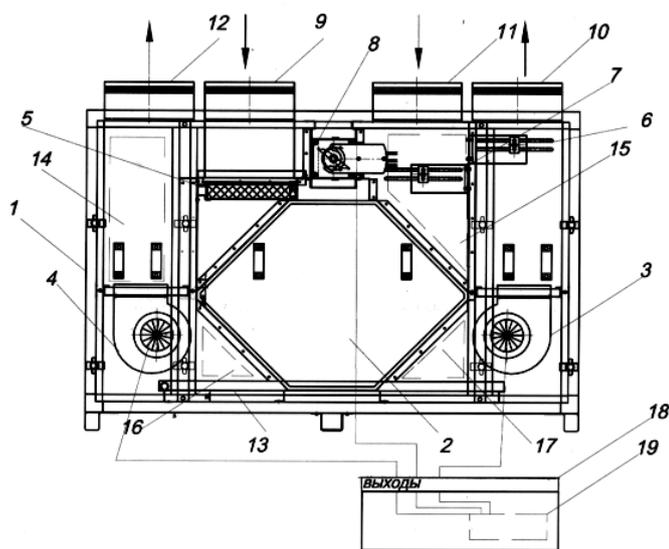


Рис. 1. Схема приточно-вытяжной установки

При работе установки 1 в условиях обмерзания чередуются 2 цикла. Первый цикл — режим теплоутилизации, при котором приточный воздух через патрубок 9 поступает в установку, проходит фильтрацию в фильтре 5, после чего проходит через рекуператор 2 в зону 17 и выходит через отверстие 10. Движение приточного воздуха обеспечивается вентилятором 3, дополнительный нагрев обеспечивается нагревательным элементом 6. Вытяжной воздух поступает в установку через отверстие 11, после чего проходит через рекуператор 2 в зону 16 и выходит через отверстие 12. Движение вытяжного воздуха обеспечивается вентилятором 4. В режиме теплоутилизации байпасный клапан 8 закрыт, дополнительный нагревательный элемент 7 выключен. Второй цикл работы установки — режим оттаивания рекуператора, при котором движение приточного воздуха останавливается путем отключения вентилятора 3. При этом байпасный клапан 8 открывается и вытяжной воздух из зоны 14 попадает в зону 15, что обеспечивает циркуляцию вытяжного воздуха через рекуператор по замкнутому контуру. Движение вытяжного воздуха обеспечивается вентилятором 4, дополнительный нагрев воздуха обеспечивается нагревательным элементом 7. Влага, образовавшаяся в результате оттаивания, удаляется через поддон 13. Таким образом, в цикле оттаивания работа приточно-вытяжной установки относительно вентиляционной системы останавливается, а оттаивание рекуператора обеспечивается путем циркуляции вытяжного воздуха по замкнутому контуру с подогревом. Управление установкой обеспечивает контроллер 19, размещенный в шкафу автоматического управления 18.

Представленная в [5] установка обладает следующими преимуществами по сравнению с прототипами и аналогами: она не требует использования дополнительной энергии на нагрев воздуха в режиме обмерзания рекуператора; установка не допускает рециркуляции воздуха в обслуживаемых помещениях в режиме оттаивания рекуператора, так как воздух движется через рекуператор по замкнутому контуру.

Оптимизация работы установки. Следует отметить, что эксплуатация установки предложенной конструкции требует определения оптимальной длительности каждого из режимов работы, при которой эффективность теплоутилизации будет максимальной. Общую эффективность теплоутилизации целесообразно рассчитывать по формуле:

$$\eta_{\text{полн}} = \frac{\theta_w - \theta_d}{\theta_t}, \quad (1)$$

где $\eta_{\text{полн}}$ — полная эффективность теплоутилизации, %; θ_w — количество теплоты, которое получено приточным воздухом в течение периода теплоутилизации, кДж; θ_d — количество теплоты, затраченное на работу электронного нагревательного элемента в режиме оттаивания, кДж; θ_t — количество теплоты, которое было бы получено приточным воздухом в течение суммарного времени двух циклов (обмерзание/оттаивание) при КПД = 100 %, кДж.

В данной статье используется понятие полной эффективности. Полная эффективность представляет собой отношение утилизированной теплоты (за вычетом той теплоты, которая была потрачена на оттаивание) к максимальному теоретически возможному количеству утилизированной теплоты за время работы рекуператора в течение двух циклов.

При эксплуатации установки время работы в режиме теплоутилизации τ_w и в режиме оттаивания рекуператора τ_d могут быть различными, при этом общая эффективность теплоутилизации, соответственно, меняется. Из формулы (1) следует, что

$$\eta_{\text{полн}} = f(\tau_w; \tau_d). \quad (2)$$

Оптимальным временем работы установки в режиме теплоутилизации будет являться такое время, при котором $\eta_{\text{полн}}$ является максимальным, то есть необходимо найти экстремум для функции (2). Рассмотрим каждый член формулы (1) отдельно. Мощность нагрева приточного воздуха в рекуператоре рассчитывается по формуле:

$$Q_s = cG_s(t_{1e} - t_{1s})\eta_{sf}, \quad (3)$$

где Q_s — мощность нагрева приточного воздуха, кВт; c — массовая теплоемкость приточного воздуха, кДж/кг·°С; t_{1e} и t_{1s} — начальные температуры соответственно вытяжного и приточного воздуха, °С; η_{sf} — момент времени, %. Согласно [7], эффективность рекуператора в процессе обмерзания снижается и определяется по формуле (4):

$$\eta_{sf} = \eta_s - \Delta\eta, \quad (4)$$

где η_s — эффективность теплоутилизатора в начальный момент времени [7]. Согласно данным проведенных ранее исследований, значение уменьшения эффективности с течением времени для данной конструкции рекуператора выражается следующей зависимостью [7]:

$$\Delta\eta = \gamma\tau_w, \quad (5)$$

где γ — коэффициент скорости снижения эффективности, определяется по формуле (6); τ_w — время работы рекуператора, которое в данном случае измеряется в минутах:

$$\gamma = 0,135\beta, \quad (6)$$

где β — коэффициент скорости обмерзания, методика вычисления подробно описана в [6]:

$$\beta = 0,0074t_{1s}^{1,55} F_{\text{freez}}^{0,34}, \quad (7)$$

где t_{1s} — начальная температура приточного воздуха, °С, в формуле используется значение по модулю; F_{freez} — площадь поверхности с отрицательной температурой по отношению к общей площади поверхности, %.

Для определения коэффициента β необходимо произвести теплотехнический расчет рекуператора, методика определения которого описана в [7]. Аналогичные данные получены и зарубежными исследователями [8—10]. Для дальнейших расчетов целесообразно измерять время τ_w в секундах, исходя из этого получаем следующее выражение для определения снижения эффективности:

$$\Delta\eta = \gamma \frac{\tau_w}{60} = 0,135\beta \frac{\tau_w}{60} = 0,0023\beta\tau_w. \quad (8)$$

В выражении (8) предполагается, что эффективность измеряется в процентах. Количество утилизированной теплоты за время работы есть определенный интеграл функции тепловой мощности по $d\tau_w$:

$$\begin{aligned} \theta_w &= \int_0^{\tau_w} (cG_s(t_{1e} - t_{1s})(\eta_s - 0,000023\beta\tau_w))d\tau_w = \\ &= \int_0^{\tau_w} (cG_s(t_{1e} - t_{1s})\eta_s - cG_s(t_{1e} - t_{1s})0,000023\beta\tau_w)d\tau_w = \\ &= cG_s(t_{1e} - t_{1s})(\eta_s\tau_w - 0,000012\beta\tau_w^2). \end{aligned} \quad (9)$$

В результате испытаний установки, изображенной на рис. 1, выявлено, что время оттаивания рекуператора и степень обмерзания, выраженная через коэффициент β , взаимосвязаны:

$$t_{df} = 7,97(\beta t_f)^{0,6}. \quad (10)$$

Данная зависимость справедлива для конкретной модели рекуператора при использовании нагревательного элемента при оттаивании, имеющего мощность 2 кВт. Рекуператор, работающий в режиме оттаивания, изображен на рис. 2. На фотографии представлена зона 1б, схематично изображенная на рис. 1.



Рис. 2. Рекуператор в режиме оттаивания

При эксплуатации рекуператоров большего или меньшего типоразмера заданной конструкции мощность нагревателя N_h должна быть изменена про-

порционально площади поверхности теплообмена. Следует отметить, что подбор оптимальной мощности элемента для оттаивания рекуператора является отдельной темой для исследований. Единица измерения τ_w и τ_d в данной зависимости — секунды. Учитывая выражения (8) и (9), выражение (1) может быть представлено в виде:

$$\eta_{\text{полн}} = \frac{cG_s(t_{1e} - t_{1s})(\eta_s \tau_w - 0,000012k\tau_w^2)^{0,6} N_h}{cG_s(t_{1e} - t_{1s})\eta_s(\tau_w + 7,97(k\tau_w)^{0,6})} \quad (11)$$

Таким образом, общая эффективность при циклическом методе эксплуатации рекуператора представляет собой сложную функцию. С помощью компьютерной программы был произведен расчет оптимального времени работы рекуператора при различных значениях коэффициента обмерзания и различных разностях температур. При построении графика функции полной эффективности значения вычислялись по формуле (11). Расход воздуха для данного рекуператора был принят $G = 1200$ кг/ч, начальная эффективность $\eta_s = 87$ %.

Для определения коэффициента обмерзания в определенном режиме работы необходимо произвести теплотехнический расчет и воспользоваться выражением (7). Методы проведения теплотехнического расчета представлены в [11—13]. Для удобства анализа результатов расчета в таблице представлены данные для определения коэффициента обмерзания в различных условиях.

№	$t_{1e}, ^\circ\text{C}$	$\varphi_{1e}, \%$	$t_{2e}, ^\circ\text{C}$	$t_{1s}, ^\circ\text{C}$	$t_{2s}, ^\circ\text{C}$	$F_{\text{freeze}}, \%$	Коэф. β
1	16,5	13,8	-17,1	-25,2	8,5	62,85	0,34
2	29,9	20	0,3	-17	19,6	25,23	1,54
3	25	35	5,25	-5,2	19,5	5,1	0,17
4	27	50	6,8	-14,2	22,5	13,3	0,96
5	18,7	37,9	-7,4	-25,9	11,6	52,36	4,1

Примечания: t_{1e} — начальная температура вытяжного воздуха, $^\circ\text{C}$; φ_{1e} — начальная относительная влажность вытяжного воздуха, %; t_{1s} — начальная температура приточного воздуха, $^\circ\text{C}$; t_{2e} — конечная температура вытяжного воздуха, $^\circ\text{C}$; t_{2s} — конечная температура приточного воздуха, $^\circ\text{C}$.

На рис. 3 представлен график функции полной эффективности для параметров в строке № 4. Экстремум для данной функции достигается при $\tau_w = 104$ мин. Время оттаивания при этом составляет 24 мин. В данном случае для определения экстремума использовалась компьютерная программа. Значение эффективности при обеспечении указанного времени работы и оттаивания составляет в данном случае 61 %.

Диаграмма для определения оптимального времени работы в зависимости от коэффициента обмерзания и начальной разности температур приточного и вытяжного воздуха представлена на рис. 4.

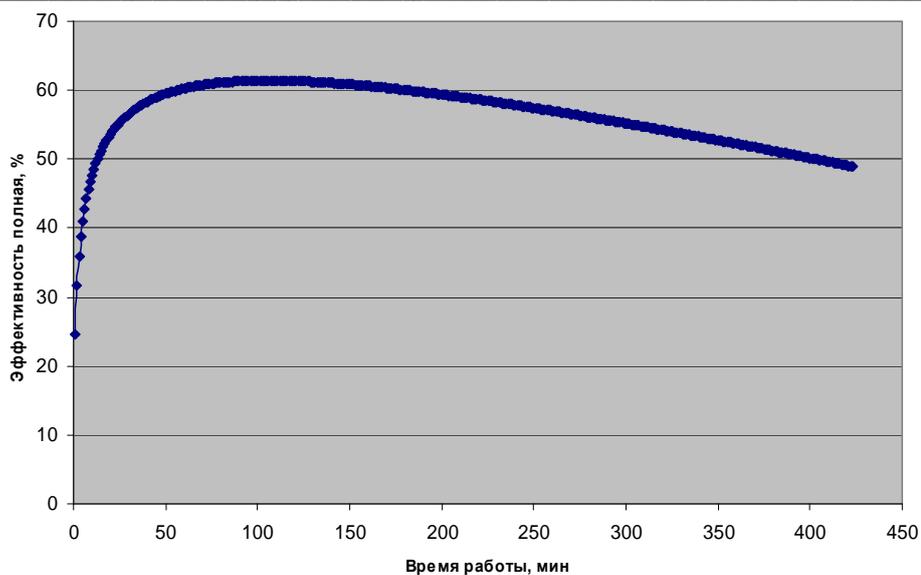


Рис. 3. График функции полной эффективности

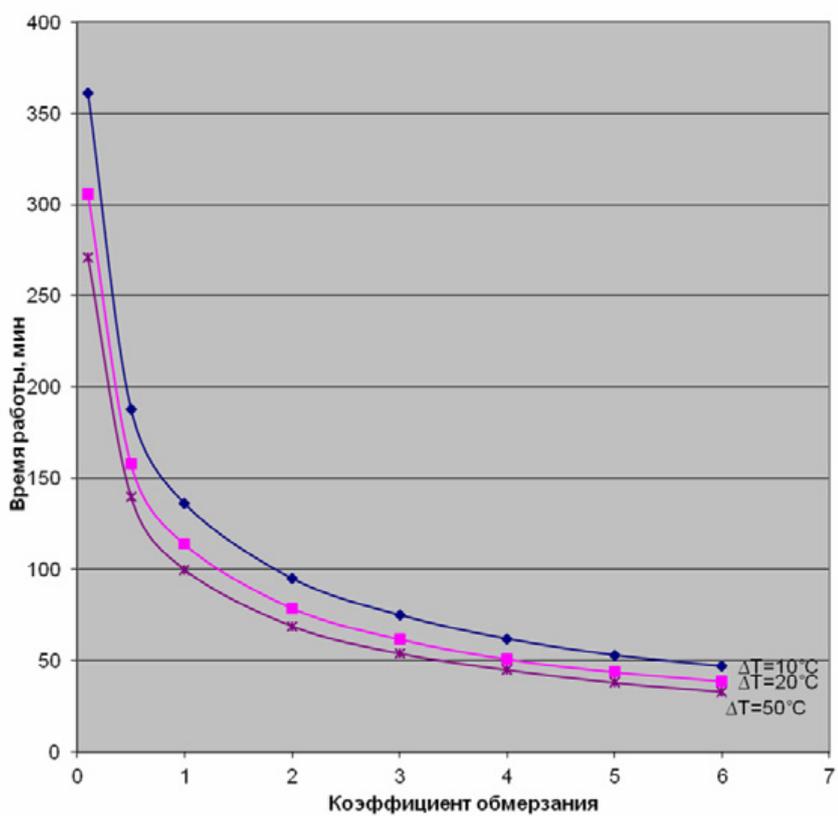


Рис. 4. Диаграмма зависимости оптимального времени работы от коэффициента обмерзания

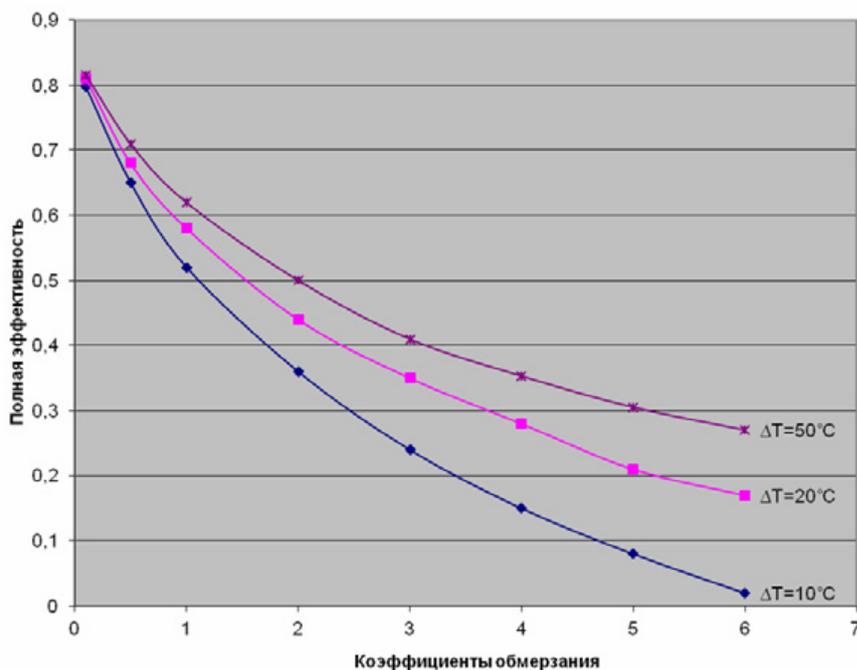


Рис. 5. Диаграмма зависимости полной эффективности от коэффициента обмерзания и разницы температур

Из диаграммы определения оптимального времени работы очевидно, что оптимальное время работы рекуператора составляет от 1 до 3 ч. Необходимо отметить, что значение времени зависит от коэффициента обмерзания, который, в свою очередь, зависит от температурного режима эксплуатации рекуператора. Температурный режим постоянно изменяется, поэтому при различных температурах наружного воздуха оптимальное время цикла различно. Из диаграммы определения полной эффективности очевидно, что при значении коэффициента обмерзания $\beta > 1 \dots 2$ полная эффективность принимает значение $\eta_t < 50\%$, но при значениях эффективности ниже 50% целесообразно использовать другие способы теплоутилизации [14], [15]. Таким образом, применение описанного в данной статье способа эксплуатации имеет экономический эффект при значениях коэффициента обмерзания $\beta < 1 \dots 2$. Для определения точных рекомендаций по применению данного способа необходимо производить технико-экономический расчет с учетом температурного режима эксплуатации на протяжении всего зимнего периода года.

Выводы.

1. Предложен метод эксплуатации высокоэффективного пластинчатого рекуператора в условиях обмерзания путем смены двух режимов: обмерзания и оттаивания. Преимущество метода заключается в том, что в режиме оттаивания полностью исключается рециркуляция, так как вытяжной воздух циркулирует через рекуператор по замкнутому кругу.

2. Разработана конструкция приточно-вытяжной установки, обеспечивающая эксплуатацию рекуператора в режиме обмерзания и оттаивания. Конструкция установки защищена патентом на полезную модель, что подтверждает научную новизну данного решения.

3. Разработана методика определения оптимального времени работы установки для каждого из режимов в зависимости от температурного режима эксплуатации рекуператора.

4. Определены направления для дальнейших исследований рассматриваемой модели рекуператора, в частности проведение технико-экономического обоснования применения предложенного метода эксплуатации для различных климатических зон.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Богословский В. Н., Поз М. Я.* Теплофизика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. М.: Стройиздат, 1983. 319 с.
2. *Карпис Е. Е.* Энергосбережение в системах кондиционирования воздуха. М.: Стройиздат, 1986. 267 с.
3. Пат. 15736 ВУ, F28F 17/00. Устройство и способ предотвращения замерзания сконденсированной влаги в рекуперационном теплообменнике / Л. Н. Данилевский, Б. И. Таурогинский; заявитель и патентообладатель «Республиканское унитарное предприятие «Институт жилища НИПТИС им.Атаева С.С.»» (ВУ). № а20090456; заявл. 2009.11.25; опубл. 2012.03.30.
4. *Шаталов М. П.* Обоснование параметров теплоутилизационной установки на базе полимерного перекрестноточного пластинчатого теплообменника для животноводческих помещений: дис... канд. техн. наук. М., 2010. 165 с.
5. Пат. № 134619. Приточно-вытяжная установка с пластинчатым рекуперативным теплоутилизатором / А. А. Кавыгин, С. А. Колодяжный; заявитель и патентообладатель ООО «ВКТехнология» (RU). № 2013130079; заявл. 01.07.2013 г., опубл. 20.11.2013.
6. Пат. № 2538516. Приточно-вытяжная установка с пластинчатым рекуперативным теплоутилизатором / А. А. Кавыгин, С. А. Колодяжный; заявитель и патентообладатель ООО «ВКТехнология» (RU). № 2013130112; заявл. 01.07.2013 г., опубл. 10.01.2015.
7. *Колодяжный С. А., Кавыгин А. А., Камбург В. Г.* Экспериментальные исследования пластинчатого перекрестно-противоточного теплоутилизатора в условиях обмерзания // Научный вестник Воронеж. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. 2014. Вып. № 1 (33) С. 20—28.
8. Optimization of counterflow heat exchanger geometry through minimization of entropy generation / P. P. M. Lerou, T. T. Veenstra, J. F. Burger, H. J. M. ter Brake, H. Rogalla // *Cryogenics*. 2005. № 45(10—11). Pp. 659—669.
9. *Strub M., Jabbour O., Bedecarrats J. P.* Experimental study of crystallization of a water droplet // *International Journal of Refrigeration*. 2003. 26(1). Pp. 59—68.
10. *Bräutigam P.* Investigations regarding the freezing behaviour of counter flow plate heat exchanger // Cold Chamber of company Truma Gerätetechnik. Putzbrunn, 2001.
11. *Колодяжный С. А., Кавыгин А. А.* Расчет современных пластинчатых рекуператоров с использованием функции коэффициента полезного действия. // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2014. Вып. 36(55). С. 182—188.
12. *Zhang L. Z., Niu J. L.* Effectiveness correlations for heat and moisture transfer processes in an enthalpy exchanger with membrane cores // *Journal of Heat Transfer*. 2002. 124(5). Pp. 922—929. doi:10.1115/1.1469524.
13. Run-around heat recovery system using cross-flow flat-plate heat exchangers with aqueous ethylene glycol as the coupling fluid / Haisheng Fan, Carey J. Simonson, Robert W. Besant, and Wei Shang // *ASHRAE Transactions*. 2005. № 111(1). Pp. 901—910.
14. *Chen L., Li Z., Guo Z.Y.* Optimization for a heat exchanger couple based on the minimum thermal resistance principle // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009. № 52(21—22). Pp. 4778—4784.
15. *Besant R. W., Simonson C. J.* Air-to-air energy recovery // *ASHRAE Journal*. 2000. 42(5). Pp. 31—42.

© Колодяжный С. А., Кавыгин А. А., 2015

Поступила в редакцию
в марте 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Колодяжный С. А., Кавыгин А. А. Оптимизация работы приточно-вытяжной установки с высокоэффективным пластинчатым рекуператором в циклическом режиме // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 40(59). С. 18—28.

Об авторах:

Колодяжный Сергей Александрович — канд. техн. наук, доцент, ректор, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет (ВГАСУ). Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, vent_2008@mail.ru

Кавыгин Александр Александрович — начальник технического отдела, ЗАО «Рязвент Плюс»; аспирант, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет (ВГАСУ). Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, kavigin@vkt.cc

S. A. Kolodyazhnyi, A. A. Kavygin

OPTIMIZATION OF CYCLICAL OPERATION OF AIR-HANDLING UNIT WITH HIGH-PERFORMANCE PLATE HEAT EXCHANGER

A new method of operation of high-performance plate heat exchangers under frosting has been invented. According to it the heat exchanger is supposed to operate cyclically. The construction of the unit eliminates the possibility of air flow shift in each regime. A series of experiments has been performed. During these experiments frosting and defrostation of the heat exchanger were observed. Having analyzed the experimental data the calculation method of optimal duration for each cycle depending on different conditions is worked out. This method is new and perspective. The calculation method of optimal duration of cycles allow to determine the algorithm of operation of air-handling unit used for the automatic control system.

Key words: heat exchanger, frosting, methodology, calculation, heat recovery.

REFERENCES

1. Bogoslovskii V. N., Poz M. Ya. *Teplotfizika apparatov utilizatsii tepla sistem otopeniya, ventilatsii i konditsionirovaniya vozdukh* [Thermophysics of heat recovery devices in the systems of heating, ventilation and air conditioning]. Moscow, Stroizdat Publ., 1983. 319 p.
2. Karpis E. E. *Energoberezhenie v sistemakh konditsionirovaniya vozdukh* [Energy efficiency in air conditioning systems]. Moscow, Stroizdat Publ., 1986. 267 p.
3. Danilevskii L. N., Tauroginskii B. I. *Ustroistvo i sposob predotvrashcheniya zamerzaniya skondensirovannoi vlagi v rekuperatsionnom teploobmennike* [Structure and means of prevention of freezing of condensed moisture in resource recovery heat exchanger. Pat. RF, no. 15736 BY, F28F 17/00].
4. Shatalov M. P. *Obosnovanie parametrov teploutilizatsionnoi ustanovki na baze polimernogo perekrestnotochnogo plastinchatogo teploobmennika dlya zhivotnovodcheskikh pomeshchenii* [Proof of parameters of heat recovery installation on the basis of polymeric cross laminar heat exchanger for livestock houses. Diss. Cand. Eng. Sci.]. Moscow, 2010. 165 p.
5. Kavygin A. A., Kolodyazhnyi S. A. *Pritочно-вытяжная установка с пластинчатым рекуперативным теплотуризатором* [Forced-air-exhaust installation with laminar recuperative heat recovery exchanger. Pat. RF, no. 134619].
6. Kavygin A. A., Kolodyazhnyi S. A. *Pritочно-вытяжная установка с пластинчатым рекуперативным теплотуризатором* [Forced-air-exhaust installation with laminar recuperative heat recovery exchanger. Patent RF, no. 2538516].
7. Kolodyazhnyi S. A., Kavygin A. A., Kamburg V. G. [Experimental Research of the Plate Cross-Counterflow Heat Exchanger in Freezing Conditions]. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura* [Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture], 2014, 1(33), pp. 20—28.
8. Lerou P. P. P. M., Veenstra T. T., Burger J. F., ter Brake H. J. M., Rogalla H. Optimization of counterflow heat exchanger geometry through minimization of entropy generation. *Cryogenics*, 2005, 45(10—11), pp. 659—669.

9. Strub M., Jabbour O., Bedecarrats J. P. Experimental study of crystallization of a water droplet. *International Journal of Refrigeration*, 2003, 26(1), pp. 59—68.
10. Bräutigam P. Investigations regarding the freezing behaviour of counter flow plate heat exchanger. *Cold Chamber of company Truma Gerätetechnik*. Putzbrunn, 2001.
11. Kolodyazhnyi S. A., Kavygin A. A. [Design of modern plate recuperators with the use of function of efficiency coefficient]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering Series: Civil Engineering and Architecture], 2014, 36(55), pp. 182—188.
12. Zhang L. Z., Niu J. L. Effectiveness correlations for heat and moisture transfer processes in an enthalpy exchanger with membrane cores. *Journal of Heat Transfer*, 2002, 124(5), pp. 922—929. doi:10.1115/1.1469524.
13. Haisheng Fan, Carey J. Simonson, Robert W. Besant, and Wei Shang. Run-around heat recovery system using cross-flow flat-plate heat exchangers with aqueous ethylene glycol as the coupling fluid. *ASHRAE Transactions*, 2005, 111(1), pp. 901—910.
14. Chen L., Li Z., Guo Z. Y. Optimization for a heat exchanger couple based on the minimum thermal resistance principle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(21—22), pp. 4778—4784.
15. Besant R. W., Simonson C. J. Air-to-air energy recovery. *ASHRAE Journal*, 2000, 42(5), pp. 31—42.

For citation:

Kolodyazhnyi S. A., Kavygin A. A. [Optimization of cyclical operation of air-handling unit with high-performance plate heat exchanger]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 40(59), pp. 18—28.

About authors:

Kolodyazhnyi Sergei Aleksandrovich — Candidate of Engineering Science, Docent, Rector, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. 84, 20-let Oktyabrya St., Voronezh, 394006, Russian Federation, vent_2008@mail.ru

Kavygin Aleksandr Aleksandrovich — Head of Technical Department, “Ryazvent Plus” CJSC; Post-graduate student, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. 84, 20-let Oktyabrya St., Voronezh, 394006, Russian Federation, kavigin@vkt.cc

УДК 536.24

В. М. Фокин, А. В. Ковылин, А. В. Попова

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОКОННОГО БЛОКА МЕТОДОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Для решения проблемы энергосбережения и снижения потерь теплоты в окружающую среду от оконного блока — пластикового профиля и стеклопакета — нужно знать теплофизические свойства. В последние годы российский рынок окон развивается довольно успешно, серьезные компании готовы производить светопрозрачные конструкции практически любой сложности. Основная функция окна — обеспечить естественное освещение помещений и способствовать обеспечению комфортных условий в нем. А так как наибольшие потери теплоты в ограждениях зданий происходят через стеклопакеты, то чтобы снизить их потери, стеклопакет должен быть с низким эквивалентным коэффициентом теплопроводности и высоким эквивалентным термическим сопротивлением теплопроводности.

Ключевые слова: фторопласт, стекло, однокамерный стеклопакет, пластиковый профиль, теплофизические свойства (ТФС), энергоэффективность, экологическая безопасность.

В настоящее время одной из наиболее актуальных проблем является поиск и создание точных, надежных и простых в реализации методов теплового расчета наружных ограждений и потерь теплоты через них, а также оценки теплофизических свойств (ТФС) используемых и вновь разрабатываемых строительных, теплоизоляционных, облицовочных материалов и изделий.

Проблемы энергосбережения и снижения потерь теплоты в окружающую среду существенно влияют на экологическую ситуацию, технико-экономические показатели и капитальные затраты на ограждения зданий. Для решения этих задач нужно знать теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость ограждений зданий. На некоторые изделия и материалы ограждений зданий паспортные данные есть, на другие — нет. Кроме того, фактические свойства материалов ограждений зданий могут изменяться в процессе эксплуатации и не соответствовать указанным в сертификате. Поэтому при возведении объектов различного назначения, в ходе строительства, необходимо знание ТФС строительных, теплоизоляционных материалов и изделий, а в процессе эксплуатации здания необходимо проводить мониторинг ТФС ограждения. Информация о свойствах новых, разрабатываемых и используемых материалов позволяет корректно проводить тепловые расчеты систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, выбирать оптимальные варианты эксплуатации и контролировать энергосбережение в зданиях. Актуальной является и задача снижения уровня эксплуатационного энергопотребления при определении ТФС.

На сегодняшний день существуют различные виды стеклопакетов [1]: однокамерные, двухкамерные. А так как теплофизические свойства оконного блока существенно влияют на тепловой и воздушный режим зданий различного назначения, а также на работу систем отопления, вентиляции и конди-

ционирования воздуха, потребляющих в настоящее время значительное количество тепловой энергии, то появилась необходимость определить его ТФС: эквивалентный коэффициент теплопроводности [2], эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности, объемную теплоемкость и эквивалентный коэффициент температуропроводности.

ТФС стеклопакетов ограждений зданий определяли методом неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов и установкой для его осуществления [3, 4].

Метод 1. Для подтверждения точности и надежности данного метода вначале был исследован фторопласт, ТФС которого приведены в справочной и технической литературе. На середину грани исследуемого образца — фторопласта установили дополнительную термопару со стороны нагревателя. Поместили фторопласт в устройство для осуществления способа неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов между нагревателем и холодильником, торцы закрыли герметическими крышками. В электронном блоке управления с помощью пульта управления на кнопках установили температуру нагревателя 30 °С, температуру холодильника 15 °С, толщину образца 30 мм и включили устройство. Далее нагреватель начинает нагреваться до заданной температуры, холодильник охлаждаться до заданной температуры. Электронный блок управления контролирует заданные температуры нагревателя и холодильника и поддерживает их с точностью $\pm 0,1$ °С до тех пор, пока тепловой поток, проходящий через испытываемый образец, не стабилизируется.

В дальнейшем наблюдение за тепловым потоком осуществляется автоматически, таймер в электронном блоке управления отсчитывает время наблюдения, по истечении которого производится запись показаний в блок памяти и автоматическое вычисление определяемых значений коэффициента теплопроводности и коэффициента термического сопротивления.

Одновременно после включения устройства производили запись температуры на поверхности фторопласта со стороны нагревателя с интервалом 1...3 мин и заносили значения в ЭВМ. Запись показаний производили до наступления стационарного режима.

Значения коэффициента теплопроводности и коэффициента термического сопротивления рассчитывали вычислительным устройством по известным формулам. Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К, вычисляли по формуле:

$$\lambda = \frac{q\delta}{T_n - T_x}, \quad (1)$$

где q — плотность стационарного теплового потока, проходящего через испытываемый образец, равна 112 Вт/м²; δ — толщина образца, равна 30 мм; T_n — температура нагревателя, равна 30 °С; T_x — температура холодильника, равна 15 °С.

$$\lambda = \frac{112 \cdot 0,030}{30 - 15} = 0,22.$$

Коэффициент термического сопротивления, м²·К/Вт, вычисляли по формуле:

$$R = \frac{T_n - T_x}{q}, \quad (2)$$

$$R = \frac{30 - 15}{112} = 0,13.$$

Для того чтобы определить объемную теплоемкость и теплопроводность исследуемого образца, выявили температурную волну на поверхности образца, которая образуется до наступления стационарного режима, когда температура поверхности перестает изменяться во времени и становится постоянной. До наступления стационарного режима температуры поверхности сопряжения образца и нагревателя будут разные. Поэтому для нахождения температуры поверхности образца со стороны нагревателя на его поверхность установили дополнительную термопару для измерения температуры от начала нагрева до наступления стационарного режима.

Далее по известным формулам вычислили на ЭВМ объемную теплоемкость, кДж/(м³·К):

$$c_p = \frac{B^2 \cdot z}{\lambda \cdot 2\pi}, \quad (3)$$

$$c_p = \frac{28^2 \cdot 2400}{0,22 \cdot 2 \cdot 3,14} = 1400,$$

где B — тепловая активность плоского образца, Вт/м²·К,

$$B = \frac{q}{\vartheta_n}, \quad (4)$$

$$B = \frac{112}{4} = 28,$$

где ϑ_n — амплитуда колебаний температурной полуволны, °С.

$$\vartheta_n = 0,5(T_{\max} - T_{\min}) \quad (5)$$

$$\vartheta_n = 0,5(25 - 17) = 4,$$

где z — время измерения температуры со стороны нагревателя до наступления стационарного режима, равно 2400 с; λ — коэффициент теплопроводности, равен 0,22; T_{\max} — максимальная температура поверхности плоского образца со стороны нагревателя, равна 25 °С; T_{\min} — минимальная температура поверхности плоского образца со стороны нагревателя, равна 17 °С; при этом коэффициент теплопроводности, м²/с, определили по формуле:

$$a = \frac{\lambda}{c_p}, \quad (6)$$

$$a = \frac{0,22}{1\,400\,000} = 0,157 \cdot 10^{-6}.$$

Результаты экспериментального исследования теплофизических свойств фторопласта приведены в табл. 1.

Таблица 1

ТФС фторопласта, определенные по методу 1

Время τ , мин	T , °C	δ , м	q , Вт/м ²	λ , Вт/м·К	c_p , кДж/(м ³ ·К)	a , м ² /с	ρ , кг/м ³
1	2	3	4	5	6	7	8
1	17	0,03	112	0,22	1400	$0,157 \cdot 10^{-6}$	2222,2
2	17,7						
3	18,2						
4	18,6						
5	18,9						
6	19,2						
7	19,5						
8	19,7						
9	19,8						
10	20						
11	20,3						
12	20,4						
13	20,5						
14	20,6						
15	20,7						
16	20,9						
17	21,2						
18	21,4						
19	21,7						
20	21,8						
21	22						
22	22,2						
23	22,3						
24	22,4						
25	22,6						
26	22,8						
27	22,9						
28	23						
29	23,2						
30	23,4						
31	23,7						
32	23,9						
33	24,1						
34	24,3						
35	24,4						
36	24,6						
37	24,7						
38	24,8						
39	24,9						
40	25,0						

Из таблицы видно, что минимальная температура поверхности фторопласта равна 17 °С, а максимальная — 25 °С. Плотность стационарного теплового потока составила 112 Вт/м·К. Коэффициент теплопроводности равен 0,22 Вт/м·К, объемная теплоемкость $1400 \cdot 10^3$ Дж/(м³·К), коэффициент температуропроводности $0,157 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

В соответствии с табличными данными температуры поверхности со стороны нагревателя (см. табл. 1) исследуемого образца строили график температурной волны исследуемого материала до наступления стационарного режима (рис. 1).

Максимальное значение температуры достигается через 40 мин и равняется 25 °С. Минимальное значение температуры равно 17 °С. После 40 мин температура поверхности образца перестала изменяться и стала постоянной.

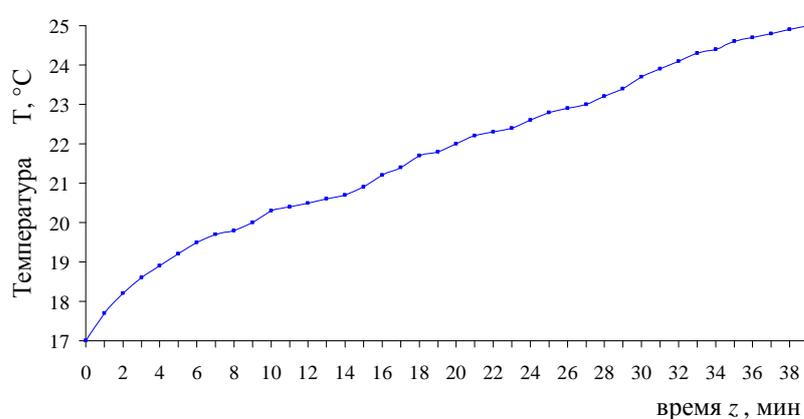


Рис. 1. График температурной волны фторопласта по методу 1

Сравнивая полученные экспериментальные данные со справочными, можно сделать вывод, что погрешность составляет не более 10 %.

Метод 2. Также для определения ТФС того же материала — фторопласта — был использован другой метод. На середину грани исследуемого образца установили дополнительные датчики: термопару со стороны нагревателя и датчик измерения теплового потока. Поместили фторопласт в устройство для осуществления способа неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов между нагревателем и холодильником, торцы закрыли герметическими крышками. В электронном блоке управления с помощью пульта управления на кнопках установили температуру нагревателя 55 °С, температуру холодильника 19 °С, толщину образца 30 мм и включили устройство. Далее нагреватель начинает нагреваться до заданной температуры, холодильник охлаждаться до заданной температуры. Электронный блок управления контролирует заданные температуры нагревателя и холодильника.

Одновременно после включения устройства производили запись температуры и теплового потока на поверхности фторопласта со стороны нагревателя с интервалом 1...3 мин и заносили значения в ЭВМ. Запись показаний производили до прекращения изменения температуры нагревателя.

Значения коэффициента теплопроводности и коэффициента термического сопротивления были определены ранее по формулам (1) и (2).

Для того чтобы определить объемную теплоемкость и температуропроводность исследуемого образца, выявили температурную волну на поверхности образца, которая образуется до наступления стационарного режима, когда температура поверхности перестает изменяться во времени и становится постоянной. До наступления стационарного режима температуры поверхности сопряжения образца и нагревателя будут разные. Поэтому для нахождения температуры поверхности образца со стороны нагревателя на его поверхность установили дополнительную термопару для измерения температуры от начала нагрева до наступления стационарного режима. Результаты экспериментального исследования теплофизических свойств фторопласта приведены в табл. 2.

Таблица 2
ТФС фторопласта, определенные по методу 2

Время τ , мин	Температура T , °С	Тепловой поток q , Вт/м ²
1	2	3
0	21,6	19
1	21,7	52
2	22,5	90
3	23,3	117
4	24	137
5	24,7	155
6	25,3	170
7	25,9	182
8	26,5	194
9	27,1	203
10	27,6	213
11	28,1	221
12	28,6	230
13	29,1	237
14	29,8	245
15	30,2	251
16	30,5	255
17	30,9	261
18	31,5	267
19	31,8	272
20	32,2	277
21	32,6	282
22	33	286
23	33,3	289
24	33,7	293
25	34,1	297
26	34,5	300
27	34,8	303
28	35,1	303
29	35,4	307
30	35,8	309
31	35,8	310
32	35,8	310

В соответствии с табличными данными строили график температурной волны исследуемого материала до наступления стационарного режима (рис. 2).

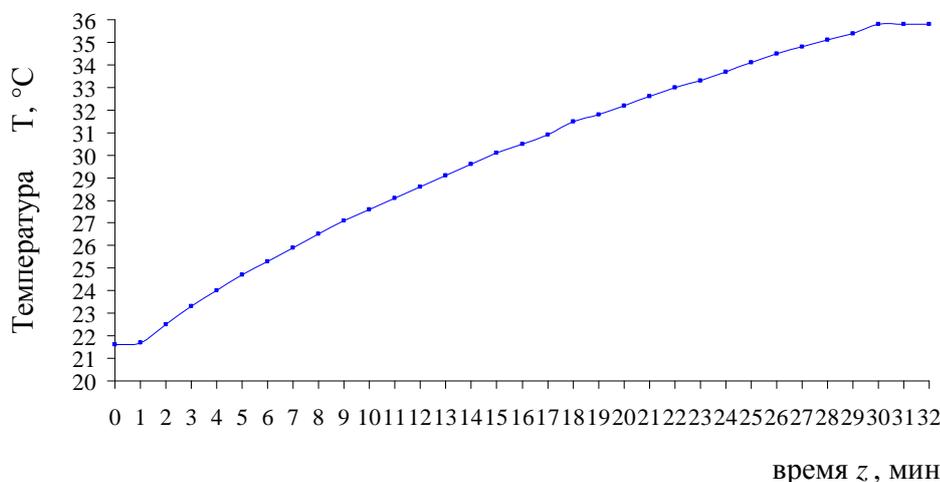


Рис. 2. График температурной волны фторопласта по методу 2

Максимальное значение температуры достигается через 32 мин и равняется 35,8 °C. Минимальное значение температуры равно 21,6 °C. После 32 мин температура поверхности образца перестала изменяться и стала постоянной. Амплитуду колебаний температурной полу волны, °C, определим по формуле (5). Причем T_{\min} возьмем равной 21,7 °C (первая минута измерений), а $T_{\max} = 30,5$ °C (шестнадцатая минута измерений).

$$\vartheta_n = 0,5(30,5 - 21,7) = 4,4.$$

Тепловую активность фторопласта, Вт/м²·К, рассчитаем по формуле (4). Причем тепловой поток возьмем равным 255 Вт/м² (шестнадцатая минута измерений).

$$B = \frac{255}{4,4} = 57,7.$$

Далее по формуле (3) рассчитываем объемную теплоемкость, кДж/(м³·К):

$$c_p = \frac{57,7^2 \cdot 900}{0,22 \cdot 2 \cdot 3,14} = 2169.$$

Коэффициент температуропроводности, м²/с, рассчитываем по формуле (6):

$$a = \frac{0,22}{2169000} = 0,101 \cdot 10^{-6}.$$

Сравнивая полученное значение коэффициента температуропроводности ($0,101 \cdot 10^{-6}$ м²/с) со справочным ($0,11 \cdot 10^{-6}$ м²/с), можно сделать вывод, что погрешность данного метода составляет на более 10 %.

Определим ТФС оконного стекла толщиной 11,5 мм. Выполнив все последовательно, как в приведенном методе 2, получим экспериментальные

данные ТФС оконного стекла. В табл. 3 приведены значения температуры оконного стекла со стороны нагревателя.

Таблица 3

Распределение температуры оконного стекла со стороны нагревателя

Время t , мин	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Температура T , °С	16,8	17,3	17,9	18,3	18,7	19,1	19,4	19,7	20	20,3	20,6	20,8
Время t , мин	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Температура T , °С	21,1	21,4	21,6	21,8	22	22,2	22,4	22,6	22,9	23,1	23,1	

В соответствии с табличными данными температуры поверхности со стороны нагревателя (табл. 3) оконного стекла построили график температурной волны исследуемого материала до наступления стационарного режима (рис. 3). Максимальное значение температуры достигается через 22 мин и равняется 23,1 °С. Минимальное значение температуры равно 16,8 °С. После 22 мин температура поверхности образца перестала изменяться и стала постоянной.

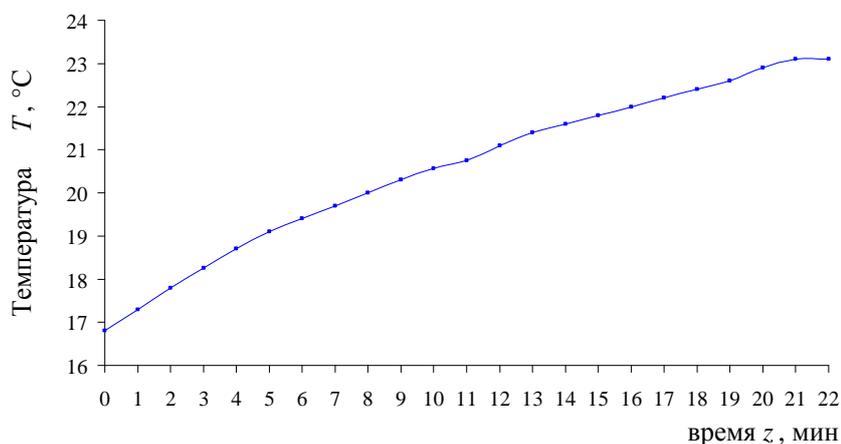


Рис. 3. График температурной волны оконного стекла

Амплитуду колебаний температурной полуволны, °С, определим по формуле (5). Причем T_{\min} возьмем равной 16,8 °С (начало измерения), а $T_{\max} = 16,8$ °С (девятая минута измерений).

$$\vartheta_{\text{н}} = 0,5(20,3 - 16,8) = 1,75.$$

Тепловую активность фторопласта, Вт/м²·К, рассчитаем по формуле (4). Причем тепловой поток возьмем равным 200 Вт/м² (девятая минута измерений).

$$B = \frac{200}{1,75} = 114,3.$$

Далее по формуле (3) рассчитываем объемную теплоемкость, кДж/(м³·К):

$$c_p = \frac{114,3^2 \cdot 540}{0,743 \cdot 2 \cdot 3,14} = 1500.$$

Коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$, рассчитываем по формуле (6):

$$a = \frac{0,743}{1500000} = 0,494 \cdot 10^{-6}.$$

Сравнивая полученное значение коэффициента температуропроводности ($0,494 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) со справочным ($0,495 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$), можно сделать вывод, что погрешность данного метода составляет на более 10 %. Т. е. с помощью предложенных двух методов определения ТФС можно определять коэффициент теплопроводности, объемную теплоемкость, коэффициент температуропроводности материалов и изделий, свойств которых в справочной и технической литературе нет [5—7].

Подтвердив рядом экспериментов с различными материалами надежность предложенных двух методов, определим ТФС (эквивалентный коэффициент теплопроводности, эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности, объемную теплоемкость, эквивалентный коэффициент температуропроводности) однокамерного стеклопакета ($4 \times 16 \times 4$), данных по которому в справочной и технической литературе нет [8—10].

Выполнив все последовательно, как в методе 1, получим экспериментальные данные ТФС однокамерного стеклопакета ($4 \times 16 \times 4$).

Эквивалентный коэффициент теплопроводности вычислили по формуле (1), и он равен $\lambda_{\text{экв}} = 0,15 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$.

Эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности вычислили по формуле (2), и оно равно $R_{\text{экв}} = 0,16 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$.

Далее вычисляем объемную теплоемкость по формуле (3):

$$c_p = \frac{18,95^2 \cdot 1860}{0,15 \cdot 2 \cdot 3,14} = 709,$$

где B — тепловая активность, рассчитывается по формуле (4),

$$B = \frac{125,1}{6,6} = 18,95,$$

q — плотность стационарного теплового потока, равна $125,1 \text{ Вт}/\text{м}^2$; $\vartheta_{\text{п}}$ — амплитуда колебаний температурной полуволны, рассчитывается по формуле (5):

$$\vartheta_{\text{п}} = 0,5(35 - 21,8) = 6,6,$$

z — время измерения температуры со стороны нагревателя до наступления стационарного режима, равно 1860 с ; $\lambda_{\text{экв}}$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности, равен $0,15$; T_{max} — максимальная температура поверхности однокамерного стеклопакета со стороны нагревателя, равна $35 \text{ }^\circ\text{C}$; T_{min} — минимальная температура поверхности однокамерного стеклопакета со стороны нагревателя, равна $21,8 \text{ }^\circ\text{C}$; при этом эквивалентный коэффициент температуропроводности определили по формуле (6):

$$a_{\text{экв}} = \frac{0,15}{709 \cdot 000} = 0,21 \cdot 10^{-6}.$$

Результаты экспериментального исследования теплофизических свойств однокамерного стеклопакета (4×16×4) приведены в табл. 4.

Таблица 4

ТФС однокамерного стеклопакета (4×16×4), определенные по методу 1

Время τ , мин	T , °С	δ , м	q , Вт/м ²	$\lambda_{\text{экв}}$, Вт/(м·К)	c_p , кДж/(м ³ ·К)	$a_{\text{экв}}$, м ² /с
0	21,8	0,024	125,1	0,150	709	$0,21 \cdot 10^{-6}$
1	22,2					
2	23					
3	23,7					
4	24,3					
5	24,8					
6	25,4					
7	26					
8	26,5					
9	27,1					
10	27,5					
11	28					
12	28,5					
13	28,8					
14	29,2					
15	29,7					
16	30					
17	30,4					
18	30,8					
19	31,2					
20	31,6					
21	31,9					
22	32,3					
23	32,6					
24	32,9					
25	33,2					
26	33,6					
27	33,9					
28	34,2					
29	34,4					
30	34,7					
31	35					

В соответствии с табличными данными температуры поверхности со стороны нагревателя (табл. 4) однокамерного стеклопакета (4×16×4) строим график температурной волны исследуемого материала до наступления стационарного режима (рис. 4).

Максимальное значение температуры достигается через 32 мин и равняется 35 °С. Минимальное значение температуры равняется 21,8 °С. После 32 мин температура поверхности образца перестала изменяться и стала постоянной.

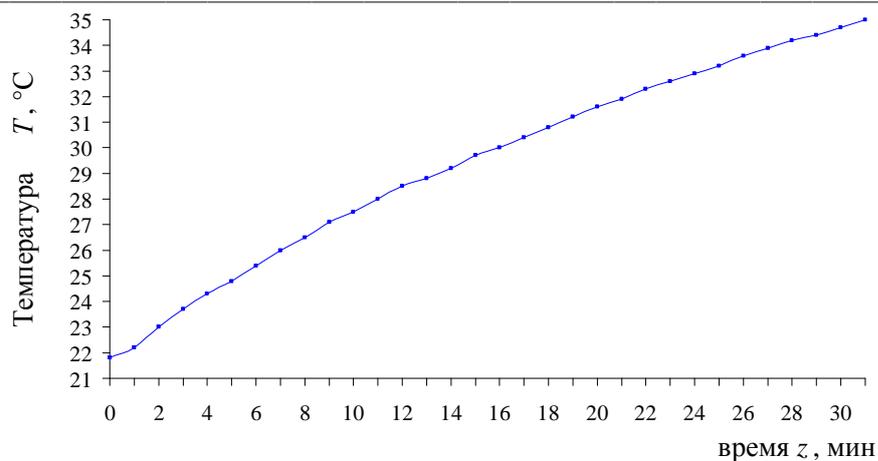


Рис. 4. График температурной волны однокамерного стеклопакета (4×16×4) по методу 1

Теперь определим ТФС однокамерного стеклопакета (4×16×4) с помощью метода 2. Выполнив все последовательно, как в методе 2, получим экспериментальные данные ТФС однокамерного стеклопакета (4×16×4), приведенные в табл. 5.

Таблица 5

ТФС однокамерного стеклопакета (4×16×4), определенные по методу 2

Время τ, мин	Температура T, °C	Тепловой поток q, Вт/м ²
1	2	3
0	21,5	13
1	21,9	53
2	22,6	85
3	23,4	108
4	24,2	123
5	24,9	134
6	25,5	140
7	26,1	145
8	26,7	150
9	27,3	154
10	27,8	157
11	28,4	160
12	28,9	164
13	29,4	166
14	30	167
15	30,5	169
16	30,9	171
17	31,4	173
18	32	174
19	32,4	177
20	32,8	178

Окончание табл. 5

Время τ , мин	Температура T , °C	Тепловой поток q , Вт/м ²
21	33,2	179
22	33,6	180
23	34,1	182
24	34,5	184
25	34,8	186
26	35,3	189
27	35,6	191
28	36	192
29	36,4	194
30	36,8	196
31	37,1	199
32	37,5	201
33	37,8	202
34	38,1	203
35	38,5	205
36	38,7	207
37	39	208
38	39,1	208

В соответствии с табличными данными температуры поверхности со стороны нагревателя (табл. 5) однокамерного стеклопакета (4×16×4) построим график температурной волны исследуемого материала до наступления стационарного режима (рис. 5). Максимальное значение температуры достигается через 38 мин и равняется 39,4 °C. Минимальное значение температуры равно 21,5 °C. После 38 мин температура поверхности образца перестала изменяться и стала постоянной.

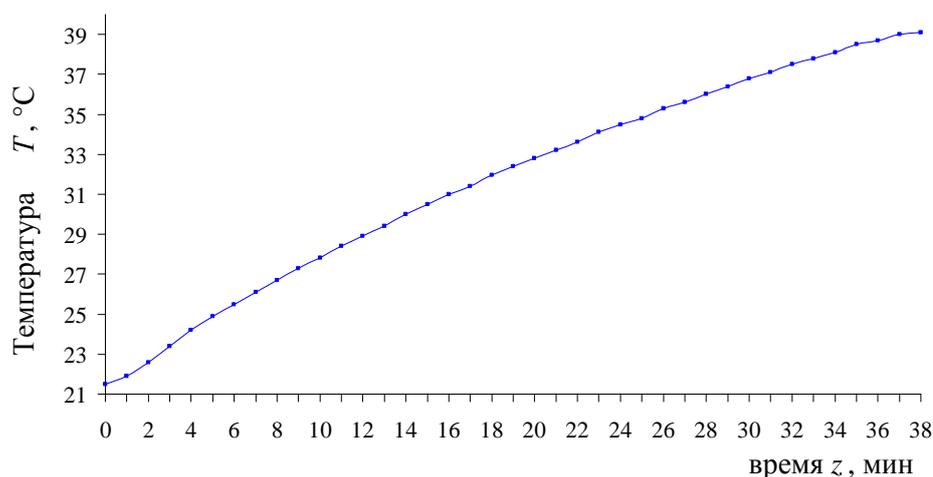


Рис. 5. График температурной волны однокамерного стеклопакета (4×16×4) по методу 2

Амплитуду колебаний температурной полуволны определим по формуле (5). Причем T_{\min} возьмем равной $21,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (первая минута измерений), а $T_{\max} = 34,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (двадцать пятая минута измерений):

$$\vartheta_{\pi} = 0,5(34,8 - 21,9) = 6,45.$$

Тепловую активность определим по формуле (4). Причем тепловой поток возьмем равным 255 Вт/м^2 (шестнадцатая минута измерений):

$$B = \frac{186}{6,45} = 28,8.$$

Далее по формуле (3) рассчитываем объемную теплоемкость:

$$c_p = \frac{28,8^2 \cdot 1440}{0,17 \cdot 2 \cdot 3,14} = 1119.$$

Эквивалентный коэффициент температуропроводности рассчитываем по формуле (6):

$$a_{\text{эKB}} = \frac{0,17}{1119000} = 0,15 \cdot 10^{-6}.$$

Сравним полученные значения объемной теплоемкости и эквивалентного коэффициента температуропроводности по двум методам (табл. 6).

Т а б л и ц а 6

Сравнение ТФС однокамерного стеклопакета ($4 \times 16 \times 4$), полученных по методу 1 и 2

	Метод 1	Метод 2
Объемная теплоемкость, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$	709	1119
Эквивалентный коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$	$0,21 \cdot 10^{-6}$	$0,15 \cdot 10^{-6}$

По полученным экспериментальным данным ТФС однокамерного стеклопакета (эквивалентного коэффициента теплопроводности, эквивалентного термического сопротивления теплопроводности, теплового потока [5, 11—13] можно сделать *выводы*.

1. При установке в приборе разных значений температур холодильника и нагревателя получаются разные значения эквивалентного коэффициента теплопроводности, эквивалентного термического сопротивления теплопроводности, теплового потока: $T_x = 5 \dots 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_n = 25 \dots 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\lambda_{\text{эKB}} = 0,152 \dots 0,169\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, $R_{\text{эKB}} = 0,157 \dots 0,142\text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ [5, 14, 15].

2. В дальнейших исследованиях ТФС однокамерного стеклопакета двумя методами можно будет определить интервал изменения объемной теплоемкости и эквивалентного коэффициента температуропроводности в зависимости от заданных температур нагревателя и холодильника [16, 17].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абдурафиков Р., Спиридонов А. В. Как оценивать энергоэффективные окна // Энергосбережение. 2013. № 8. С. 28—31.

2. *Лепилов В. И.* Исследование теплофизических свойств и характеристик систем массивных экранов : дис... канд. техн. наук. Астрахань, 2007.
3. *Фокин В. М., Ковылин А. В.* Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов: пат. № 2421711 Рос. Федерация, МПК⁸ G 01 N 25/00; заявл. 29.07.2009; опубл. 10.02.2011, Бюл. № 4. 9 с.
4. *Фокин В. М., Ковылин А. В., Попова А. В.* Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов и установка для его осуществления : пат. № 2530441 Росс. Федерация, МПК⁸ G 01 N 25/18; заявл. 09.07.2013; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 28.
5. *Фокин В. М., Ковылин А. В., Попова А. В.* Экспериментальное исследование теплофизических свойств стеклопакета и пластикового профиля оконного блока // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2014. Вып. 38 (57). С. 158—168.
6. *Фокин В. М., Ковылин А. В., Чернышов В. Н.* Энергоэффективные методы определения теплофизических свойств строительных материалов. М.: Спектр, 2011. 155 с.
7. *Фокин В. М., Ковылин А. В.* Теоретические основы определения теплопроводности, объемной теплоемкости и температуропроводности материалов по тепловым измерениям на поверхности методом неразрушающего контроля // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2009. Вып. 14(33). С. 123—127.
8. *Ковылин А. В., Фокин В. М.* Определение теплотехнических свойств оконного стекла для ограждений зданий // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2011. Вып. 21 (40). С. 124—127.
9. *Фокин В. М., Ковылин А. В.* Теплофизические исследования строительных материалов методом неразрушающего контроля с использованием тепломера // Теплофизические исследования и измерения в энергосбережении, при контроле, управлении и улучшении качества продукции и услуг: материалы Междунар. теплофиз. шк. Тамбов: ТГТУ, 2010. С. 23—26.
10. *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 Всероссийской науч.-технической конф. по итогам НИР университета за 2008 г. Самара : СГАСУ, 2009. С. 273—275.
11. *Фокин В. М.* Основы энергосбережения и энергоаудита. М.: Машиностроение-1, 2006. 256 с.
12. *Фокин В. М.* Научно-методологические основы определения теплофизических свойств материалов методом неразрушающего контроля. М.: Машиностроение-1, 2003. 140 с.
13. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / под общ. ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. М.: Энергоиздат, 1982. 512 с. (Теплоэнергетика и теплотехника).
14. *Champoussin J.-C.* Sur la pertinence des modeles thermocinetiques et l'estimation de leurs caracteristiques // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1983. Vol. 26. Iss. 8. Pp. 1109—1264.
15. *Chohan R. K.* Effects of manufacturing tolerance on the thermal response of industrial thermometers // Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part C: Mechanical Engineering Science. 1986. Vol. 200. №. 43. Pp. 265—269.
16. *Dantzig J. A.* Improved transient response of thermocouple sensor // Rev. Sci. Instrum. 1985. Vol. 56. P. 723.
17. *Lanivik M.* Thermometry by surface probes // High Temperatures-High Pressures. 1983. Vol. 15. № 2. P. 199—204.

© Фокин В. М., Ковылин А. В., Попова А. В., 2015

Поступила в редакцию
в марте 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Фокин В. М., Ковылин А. В., Попова А. В. Экспериментальное определение энергоэффективности и экологической безопасности оконного блока методом неразрушающего контроля // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 40(59). С. 29—44.

Об авторах:

Фокин Владимир Михайлович — д-р техн. наук, проф., зав. каф. энергоснабжения и теплотехники, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Ковылин Андрей Васильевич — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры энергоснабжения и теплотехники, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Попова Анна Владимировна — учебный мастер кафедры энергоснабжения и теплотехники, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

V. M. Fokin, A. V. Kovylin, A. V. Popova

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF ENERGY EFFICIENCY AND ECOLOGICAL SAFETY OF THE WINDOW BLOCK BY METHOD OF NONDESTRUCTIVE CONTROL

For the solution of the problem of energy saving and decrease in losses of warmth in the environment from the window block — a plastic profile and a double-glazed window, it is necessary to know heatphysical properties (HPP). In recent years the Russian market of windows has developed quite successfully, the serious companies are ready to make translucent designs practically of any complexity. The main function of a window is to provide the natural lighting of rooms and to promote providing comfortable conditions in rooms. And as the greatest losses of warmth in protections of buildings pass through double-glazed windows to reduce losses of warmth and to provide comfortable conditions, the double-glazed window has to be with low equivalent coefficient of heat conductivity and the high equivalent thermal resistance of heat conductivity.

Key words: fluoroplastic, glass, single-chamber double-glazed window, plastic profile, heatphysical properties (HPP), energy efficiency, ecological safety.

REFERENCES

1. Abdurafikov R., Spiridonov A. V. [How to estimate energy efficient windows]. *Energoberezhenie* [Energy efficiency], 2013, no. 8, pp. 28—31.
2. Lepilov V. I. *Issledovanie teplofizicheskikh svoystv i kharakteristik sistem massivnykh ekranov: dis. kand. tekhn. nauk* [Study of thermophysical properties and characteristics of massive screens systems. Diss. Cand. Eng. Sci.]. Astrakhan', 2007.
3. Fokin V. M., Kovylin A. V. *Sposob nerazrushayushchego kontrolya kompleksa teplofizicheskikh kharakteristik tverdykh stroitel'nykh materialov* [Method of nondestructive control over a complex of thermophysical characteristics of solid construction materials. Patent RF no. 2421711].
4. Fokin V. M., Kovylin A. V., Popova A. V. *Sposob nerazrushayushchego kontrolya kompleksa teplofizicheskikh kharakteristik tverdykh stroitel'nykh materialov i ustanovka dlya ego osushchestvleniya* [Method of nondestructive control over a complex of thermophysical characteristics of solid construction materials and installation for its implementation. Patent RF no. 2530441].
5. Fokin V. M., Kovylin A. V., Popova A. V. [Experimental study of thermal-physical properties of a double-glazed window and plastic profile of the window block]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2014, iss. 38(57), pp. 158—168.
6. Fokin V. M., Kovylin A. V., Chernyshov V. N. *Energoeffektivnye metody opredeleniya teplofizicheskikh svoystv stroitel'nykh materialov* [Energy efficient methods of determination of thermophysical properties of construction materials]. Moscow, Spektr Publ., 2011. 155 p.
7. Fokin V. M., Kovylin A. V. [Theoretical fundamentals of the determination of thermal conductivity, volumetric heat capacity and thermal diffusivity of materials according to surface thermal measurements through the method of nondestructive test]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2009, iss. 14(33), pp. 123—127.

8. Kovylin A. V., Fokin V. M. [Definition thermal characteristics of the window glass for barriers buildings]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2011, iss. 21(40), pp. 124—27.

9. Fokin V. M., Kovylin A. V. [Thermophysical study of construction materials by the method of nondestructive control with the use of a heat flow meter]. *Teplofizicheskie issledovaniya i izmereniya v energosberezhenii, pri kontrole, upravlenii i uluchshenii kachestva produkcii i uslug: materialy Mezhdunar. teplofiz. shk.* [Thermophysical studies and measurements in energy efficiency, at the control, management and improvement of quality of production and services: materials of the Inter. thermophys. sch.] Tambov, TSTU Publ., 2010. Pp. 23—26.

10. Fokin V. M., Kovylin A. V. [Measurement of thermophysical properties of building envelopes by the method of nondestructive control with the use of an electronic density meter for heat flow of ITP-MG 4.03 "Stream"]. *Aktual'nye problemy v stroitel'stve i arkhitekture. Obrazovanie. Nauka. Praktika : mater. 66-i Vserossiiskoi nauch.-tekhnicheskoi konf. po itogam NIR universiteta za 2008 g.* [Actual problems in construction and architecture. Education. Science. Practice. Proc. 66 All-Rus. Conf.]. Samara, SSUACE Publ., 2009. pp. 273 — 275.

11. Fokin V. M. *Osnovy energosberezheniya i ergoaudita* [Principals of energy saving and energy audit]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2006. 256 p.

12. Fokin V. M. *Nauchno-metodologicheskie osnovy opredeleniya teplofizicheskikh svoystv materialov metodom nerazrushayushchego kontrolya* [Scientific and methodological principals of measurement of thermophysical properties of materials by the method of nondestructive control]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2003. 140 p.

13. Grigor'ev V. A., Zorin V. M. (ed.) *Teplo- i massoobmen. Teplotekhnicheskii eksperiment: Spravochnik* [Heat- and mass exchange. Thermo-technical experiment: Reference book]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 512 p.

14. Champoussin J.-C. Sur la pertinence des modeles thermocinetiques et l'estimation de leurs caracteristiques. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, August 1983, 26(8), pp 1109—1264.

15. Chohan R. K. Effects of manufacturing tolerance on the thermal response of industrial thermometers. *Proc. of The Institution of Mech. Eng., Part C: Mech. Eng. Sci*, 1986, 200(43), pp. 265—269.

16. Dantzig J. A. Improved transient response of thermocouple sensor. *Rev. Sci. Instrum.*, 1985, 56, p. 723.

17. Lanivik M. Thermometry by surface probes. *High Temperatures-High Pressures*, 1983, 15(2), pp. 199—204.

For citation:

Fokin V. M., Kovylin A. V., Popova A. V. [Experimental determination of energy efficiency and ecological safety of the window block by method of nondestructive control]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 40(59), pp. 29—44.

About authors:

Fokin Vladimir Mikhailovich — 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

Kovylin Andrei Vasil'evich — 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 Federation

Popova Anna Vladimirovna — 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

УДК 628.316.13

Е. В. Москвичева^а, А. В. Москвичева^а, Д. О. Игнаткина^а, П. А. Сидякин^б, Д. В. Щитов^б

^а *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

^б *Филиал Северо-Кавказского федерального университета в г. Пятигорске*

КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФЛОТАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СМЕШАННОГО РЕАГЕНТА НА ОСНОВЕ ОТХОДА ПРОИЗВОДСТВА

Изучена возможность и определены оптимальные параметры процесса флотационной очистки воды от эмульгированных нефтепродуктов с помощью разработанного смешанного реагента, полученного на основе нефтеотхода, структурированного полимеротходом. Представлены результаты по использованию смешанного реагента в качестве сорбционно-коалесцирующей загрузки, что увеличивает эффективность флотационной очистки воды от нефтесодержащих веществ, т. е. остаточная концентрация снижается по сравнению с обычной флотацией. Выявлены основные закономерности, которые могут быть использованы для расчета технологических аппаратов и установления механизма флотационно-сорбционных методов. Получено достаточно универсальное уравнение кинетики флотации, которое возможно использовать для описания микрофлотационных процессов частиц различной степени дисперсности. Исследован процесс флотации со смешанным реагентом на лабораторной установке на реальных нефтесодержащих сточных водах.

Ключевые слова: нефтепродукты, очистка сточных вод, флотация, флотационно-сорбционный метод, смешанный реагент, скорость флотации, фракционный состав.

Одним из основных путей интенсификации процесса флотации является использование собирателей дисперсной фазы эмульсий [1—4]. На сегодняшний день широкое применение процессов реагентной флотации в практике сдерживается тем, что отсутствуют дешевые нетоксичные и доступные собиратели. Результаты проведенных исследований показывают, что использование смешанного реагента (СР) в качестве сорбционно-коалесцирующей загрузки в значительной степени повышает эффективность флотационной очистки воды от нефтепродуктов, т. е. остаточная концентрация по сравнению с очисткой сточных вод методом флотации снижается (табл. 1). Повышение эффективности очистки воды хорошо согласуется с данными по нефтеемкости СР. Остаточное содержание нефтепродуктов снижается при переходе от сорбентов с низкой удельной поверхностью (размер частиц 0,5...2,0 мм) к сорбентам с высокой удельной поверхностью (размер частиц 0,03...0,1 мм). В такой же последовательности меняются сорбционная емкость и коалесцирующие свойства нефтесорбентов, из чего следует, что рассмотренные выше сорбционные свойства СР по нефтепродуктам должны учитываться при описании флотационных процессов [5, 6]. Полученные закономерности могут быть использованы для установления механизма флотационно-сорбционных методов и расчета технологических аппаратов при наличии соответствующих кинетических моделей.

В настоящее время для оценки количественных характеристик сложных физико-химических процессов (к которым относится и процесс флотации) широко используется метод математического моделирования, базирующийся на стратегии системного анализа [7—10].

Сущность этой стратегии заключается в представлении процесса как сложной взаимодействующей иерархической системы с последующим качественным и количественным анализом ее структуры.

Наиболее точными прогнозирующими свойствами, позволяющими корректно описывать особенности изучаемой системы в широком диапазоне изменения ее параметров, являются теоретические модели (портретные модели), основывающиеся на фундаментальных закономерностях системы существенных, устойчивых и неслучайных связей между свойствами ее материальных объектов.

Таблица 1

Остаточное содержание нефтепродуктов при очистке сточных вод с различным содержанием электролитов (начальная концентрация нефтепродуктов 150 мг/л)

Характеристика процесса	Содержание электролита	Остаточное содержание нефтепродуктов после 15 мин флотации, мг/л	Остаточное содержание нефтепродуктов после 30 мин флотации, мг/л
Флотация без СР	10,0 г/л NaCl	29,3	16,6
	30 мг/л $Al_2(SO_4)_3$	62,4	41,3
	30 мг/л $Al_2(SO_4)_3$ + 2 г/л NaCl	31,6	18,3
	5 мг/л $Al_2(SO_4)_3$ + 2 г/л NaCl	51,2	28,9
Флотация со СР (размер частиц 0,5...2,0 мм)	10,0 г/л NaCl	1,2	0,21
	30 мг/л $Al_2(SO_4)_3$ + 2 г/л NaCl	1,6	0,22
	5 мг/л $Al_2(SO_4)_3$ + 2 г/л NaCl	2,1	0,27
Флотация со СР (размер частиц 0,03...0,1 мм)	10,0 г/л NaCl	0,28	0,03
	30 мг/л $Al_2(SO_4)_3$ + 2 г/л NaCl	0,36	0,03
	5 мг/л $Al_2(SO_4)_3$ + 2 г/л NaCl	0,49	0,04

Теоретические модели принято подразделять на следующие группы:

- 1) модели, полученные с использованием термодинамического подхода;
- 2) модели, полученные с использованием кинетического подхода.

Термодинамический подход позволяет оценить вероятность перехода системы из одного состояния в другое, используя понятие изменения ее внутренней энергии.

Кинетический подход, в отличие от термодинамического, предполагает изучение скорости процесса перехода, то есть изучение количественных и качественных характеристик процесса в момент перехода системы из одного состояния в другое. Модели флотации, как правило, основываются на различных допущениях и отличаются друг от друга видом математического уравнения,

описывающего скорость протекания процесса, — это и обыкновенные дифференциальные уравнения, и уравнения в частных производных (первого или более высокого порядка) с однородной или распределенной константой скорости флотации. Наибольшие трудности возникают при разработке кинетических моделей флотации частиц коллоидной степени дисперсности.

Кинетическая модель, описывающая во времени все элементарные акты процесса флотации, была приведена в работах [8—13], где подробно рассмотрен процесс осаждения дисперсной частицы на поверхность всплывающего единичного пузырька воздуха с учетом ее инерционности.

При приближении к поверхности пузырька инерционной частицы ее траектория почти не изменяется, так как силы инерции компенсируют гидродинамическое воздействие потока жидкости, изменяющего свою траекторию вблизи границы раздела фаз «газ — жидкость». Частица движется прямолинейно вплоть до столкновения с поверхностью пузырька воздуха, которое произойдет, если прицельное расстояние (расстояние между проекциями центра пузырька и центра частицы) будет меньше суммы радиусов пузырька и частицы.

Безинерционные частицы вблизи поверхности пузырька воздуха ведут себя иначе. При обтекании поверхности пузырька жидкостью линии тока искривляются, увлекая за собой частицу. Чем меньше размер частицы и разница ее плотности с веществом среды, тем меньше действующие силы инерции и больше приближение ее траектории к траектории линии тока жидкости.

Возможность осаждения на поверхность всплывающего пузырька воздуха дисперсной частицы под действием сил инерции определяется критерияльным комплексом:

$$\lambda = \frac{l}{r_{\text{п}}} \geq \frac{1}{24}, \quad (1)$$

где l — длина инерционного пробега частицы, м; $r_{\text{п}}$ — радиус пузырька воздуха, м:

$$l = \frac{Vr_{\text{ч}}^2 \Delta\rho}{9\eta}, \quad (2)$$

где V — скорость движения частицы относительно пузырька, м/с; $r_{\text{ч}}$ — радиус частицы, м; $\Delta\rho$ — разность плотностей жидкости и частицы, кг/м³; η — динамический коэффициент вязкости среды, Па·с.

При $\lambda < \frac{1}{24}$ будет иметь место безинерционный механизм осаждения дисперсной частицы.

Вывести уравнение, описывающее кинетику процесса флотации, можно из химического закона действия масс:

$$\frac{\partial N}{\partial T} = -K_C \cdot N^a \cdot N_I^b \quad (3)$$

где N — счетная концентрация флотируемых частиц, шт./м³; N_I^b — счетная концентрация воздушных пузырьков, шт./м³; a и b — показатели степени; K_C — константа скорости процесса флотации, с⁻¹.

Поскольку концентрация воздушных пузырьков во флотационном объеме остается постоянной, то формулу (3) можно записать в виде:

$$\frac{\partial N}{\partial T} = -K \cdot N^a, \quad (4)$$

где K — приведенная константа скорости процесса флотации.

Преобразуя формулу (4) и интегрируя ее для случая $a = 1$, получаем формулу, описывающую кинетику процесса флотации дисперсных частиц пузырьками воздуха:

$$N_T = N_0 \cdot e^{-KT}, \quad (5)$$

где N_0 и N_T — счетные концентрации флотируемых частиц в начальный момент времени и через T секунд.

Умножение правой и левой частей уравнения (5) на массу одной счетной дисперсной частицы m_p , кг/шт., позволит перейти от счетных концентраций к массовым концентрациям, кг/м³:

$$C_T = C_0 \cdot e^{-KT}. \quad (6)$$

Таким образом, зная продолжительность процесса флотации T , с, начальную и конечную концентрацию флотируемых частиц C_0 , C_T , в соответствии с формулой (6) можно определить значение константы скорости процесса флотации K_C , с⁻¹:

$$K = \frac{\ln \frac{C_0}{C_T}}{T}. \quad (7)$$

Определить величину константы скорости процесса флотации можно также по формуле:

$$K = \frac{3q \cdot E}{4r_n}, \quad (8)$$

где q — интенсивность барботирования (объем газа, поступающего в единицу времени через единицу площади поперечного сечения флотатора), м³/(м²·с); r_n — среднестатистический радиус пузырька воздуха, м; E — коэффициент эффективности захвата флотируемой частицы пузырьком воздуха, с⁻¹.

Для безинерционной дисперсной частицы радиусом r_c в стоксовском режиме всплывания пузырька воздуха коэффициент захвата можно определить по формуле:

$$E = \frac{1}{2} \frac{r_c^{1.6}}{r_n^2} A^{1/6}, \quad (9)$$

где A — константа Гамакера, Дж.

Таким образом, при известных значениях интенсивности барботирования флотационного объема q , м³/(м²·с), среднестатистических радиусов флотируемых частиц пузырьков воздуха r_c и r_n , м, начальной концентрации дисперсных

частиц C_0 , кг/м³, продолжительности процесса флотации T , с, по формулам (9), (8) и (6) можно определить концентрацию дисперсных частиц в очищенных стоках и эффект их очистки методом флотации по формуле (10).

$$\alpha = ((C_0 - C) / C_0)100, \quad (10)$$

где α — степень очистки, %; C_0 — начальная концентрация вещества в растворе, мг/л; C — концентрация вещества в очищенной воде, мг/л.

В качестве основы для создания кинетических моделей флотационного и флотационно-сорбционного методов для высокодисперсных эмульсий был взят подход, включающий в себя представления о гетерокоалесценции частиц эмульсий с поверхностями раздела фаз «частица — пузырек воздуха» и «частица — сорбент» и хорошо описанный в работах [13—15].

С достаточной степенью приближения эти процессы можно разделить на несколько стадий: гетерокоалесценция капель эмульсии с постоянно обновляющейся поверхностью всплывающих пузырьков воздуха, захват капель эмульсии пузырьками и вынос их на поверхность, коалесценция капель эмульсии на поверхности раствора или на загрузке, сорбция масляной фазы загрузкой.

Исследования сорбционных свойств СР показали, что сорбция масляной фазы поверхностью СР описывается уравнением Лэнгмюра:

$$A = A_\infty \frac{KC}{1 + KC}, \quad (11)$$

где A — адсорбция; A_∞ — предельная величина адсорбции (емкость адсорбционного монослоя); C — равновесная концентрация адсорбируемого компонента жидкости; K — константа равновесия ($K = k_1 / k_2$).

При решении задач по кинетике адсорбции обычно рассматривают два предельных случая — диффузионную и адсорбционную кинетику. Условия перехода от одного типа кинетики к другому обычно получают путем сравнения времен диффузионной τ_d и адсорбционной $\tau_{ад}$ релаксации. При справедливости неравенства $\tau_{ад} \ll \tau_d$ выполняется условие диффузионной кинетики, а при справедливости обратного неравенства, $\tau_d \ll \tau_{ад}$, выполняется условие адсорбционной кинетики.

Время диффузионной релаксации τ_d обычно оценивают как время установления равновесия в поверхностном слое. Время адсорбционной релаксации $\tau_{ад}$ получают из уравнения:

$$C_{ад} = (\alpha + \beta C / A_\infty)^{-1} = A / \beta C, \quad (12)$$

где A — равновесное значение адсорбции; β и α — соответственно коэффициенты адсорбции и десорбции.

Учитывая, что процессу адсорбции в ходе флотации предшествует процесс коалесценции, то есть объединение отдельных капель масла с образованием масляной пленки на поверхности сорбента, протекающий с большими затруднениями, связанными с наличием сольватного фактора стабилизации частиц эмульсии, в большинстве случаев выполняется условие адсорбционной кинетики ($\tau_d \ll \tau_{ад}$).

Коэффициенты адсорбции β и десорбции α для адсорбционной кинетики могут быть определены из уравнения:

$$dA / d\tau = \beta C \cdot (1 - A / A_{\infty}) - \alpha A, \quad (13)$$

представляющего собой кинетический аналог уравнения Лэнгмюра и основывающегося на представлении о лимитирующей роли потенциального энергетического барьера между поверхностным слоем и раствором.

После интегрирования (13) получаем:

$$A = A_{\infty} [1 - \exp(-(\beta C / A_{\infty} + \alpha)\tau)] \quad (14)$$

или

$$-\ln(1 - A / A_{\infty}) = (\beta C / A_{\infty} + \alpha)\tau. \quad (15)$$

Из уравнения (15) следует, что константа скорости адсорбции

$$K_{\tau} = \beta C / A_{\infty} + \alpha. \quad (16)$$

Полученное кинетическое уравнение строго применимо при описании адсорбции молекулярно-растворенных веществ из водных растворов на поверхности раздела фаз. При описании адсорбции коллоидно-растворенных веществ (в нашем случае частиц эмульсии) коэффициенты β и α приобретают иной физический смысл, связанный с закреплением частиц на поверхности раздела фаз. Исходя из представлений гетерокоалесценции, β можно охарактеризовать как коэффициент закрепления частиц на поверхности, а α — коэффициент срыва (ухода) частиц с поверхности. При введении этих представлений полученное уравнение сохраняет свой прежний вид при условии, что под C мы будем понимать частичную концентрацию. Кроме того, это уравнение справедливо как для поверхности раздела фаз «жидкость — газ», так и «жидкость — твердое тело».

При условии квазистационарности процесса флотации скорость изменения концентрации частиц дисперсной фазы эмульсии C должна описываться уравнением:

$$-dC / dt = K_{\tau} A, \quad (17)$$

показывающим, что убывание частиц эмульсии во времени в процессе флотации пропорционально величине адсорбции масла, где C — частичная концентрация эмульсии; A — количество масла, адсорбируемое единичной поверхностью пузырьков за время их нахождения в растворе τ (при обычной флотации), или количество масла, адсорбируемого единичной поверхностью сорбента (в случае флотационно-сорбционного процесса).

В уравнении (17) K_{τ} — константа скорости флотации, представляющая собой удельную поверхность границы раздела фаз «жидкость — газ», генерируемую в течение всего времени процесса.

$$K_{\tau} = \frac{L \cdot S_n}{S_k \cdot h}, \quad (18)$$

где S_n — суммарная поверхность пузырьков воздуха, S_k — площадь поперечного сечения флотационного аппарата; h — высота раствора во флотацион-

ном аппарате; L — коэффициент пропорциональности, характеризующий гидродинамическую обстановку процесса.

Тогда уравнение (17) предстает в виде:

$$-dC / dt = (LS_{\Pi} / (S_k h))A. \quad (19)$$

Решая совместно уравнение (3) и (19), получаем:

$$-dC / dt = (LS_{\Pi} / (S_k h))A_{\infty} [1 - \exp(-(\beta C / A_{\infty} - \alpha)\tau)]. \quad (20)$$

Разлагая $\exp(-(\beta C / A_{\infty} - \alpha)\tau)$ в ряд Тейлора и ограничиваясь первыми двумя членами разложения ввиду малости последующих членов, получаем:

$$\exp(-(\beta C / A_{\infty} - \alpha)\tau) = 1 - (\beta C / A_{\infty} - \alpha)\tau. \quad (21)$$

Совместное решение уравнений (20) и (21) дает:

$$-dC / dt = (LS_{\Pi} / (S_k h))(\beta C - \alpha A_{\infty})\tau. \quad (22)$$

Поскольку время контакта фаз $\tau = h/w_{cp}$ (где h — высота раствора во флотационном аппарате, w_{cp} — средняя скорость всплывания пузырьков воздуха), то уравнение (22) может быть записано в виде:

$$-dC / dt = (LS_{\Pi} / (S_k h))(h / w_{cp})(\beta C - \alpha A_{\infty}). \quad (23)$$

Принимая величины $S_{уд}$, h , w_{cp} постоянными за время протекания флотационного процесса, получаем:

$$-dC / dt = K_{\phi}(\beta C - \alpha A_{\infty}). \quad (24)$$

При значительном преобладании актов закрепления коллоидных частиц эмульсии над актами срыва, что является необходимым условием флотации, величиной αA_{∞} можно пренебречь ввиду малости коэффициента α . Тогда скорость процесса флотации дисперсной фазы эмульсии в первом приближении описывается уравнением

$$-dC / dt = K_{\phi}\beta C, \quad (25)$$

аналогичным уравнению гетерогенной реакции первого порядка.

При наличии энергетических затруднений, связанных с возникновением электростатического барьера отталкивания в ходе гетерокоалесценции ($\Delta E_{эл}$), в уравнение (25) необходимо ввести поправку, учитывающую фактор замедления скорости флотации:

$$-dC / dt = K_{\phi}\beta C \exp(-\Delta E_{эл} / kT). \quad (26)$$

Но даже в отсутствии электростатического барьера отталкивания препятствием для быстрой коалесценции может быть наличие сольватного фактора стабилизации дисперсной фазы эмульсии. Очевидно, что информация о такого рода препятствии, исходя из приведенных выше рассуждений, заложена в коэффициенте β , который может быть представлен в виде:

$$\beta = \exp(-\Delta E_{сол} / kT). \quad (27)$$

С учетом всех энергетических затруднений, связанных с закреплением частиц эмульсии на поверхности всплывающих пузырьков воздуха, а также на поверхности сорбционно-коалесцирующей загрузки, в окончательном виде уравнение (26) выглядит следующим образом:

$$-dC / dt = K_{\phi} \beta C \exp(-\Delta E_{\text{кол}} / kT) \exp(-\Delta E_{\text{эл}} / kT) C = K'_{\phi} C. \quad (28)$$

Анализ данного уравнения показывает, что константа скорости флотации K'_{ϕ} является сложной характеристикой, включающей в себя влияние на скорость флотации как гидродинамических условий процесса, заложенных в K_{ϕ} , так и влияние энергетических параметров, тормозящих протекание процесса и учитываемых в предэкспонентах уравнения.

Для расчета констант скорости флотации дифференциальное уравнение (28) удобнее представить в интегральном виде:

$$\ln(C_0 / C) = -K'_{\phi} (t - t_0), \quad (29)$$

где C_0 и C — частичная концентрация дисперсной фазы эмульсии в начальный момент (t_0) и время t соответственно; K'_{ϕ} — константа скорости флотации.

Таблица 2

Константы флотации при проведении процесса флотации со СР и без него

Характеристика процесса	Константа скорости флотации K'_{ϕ}	
	мин ⁻¹	с ⁻¹
Флотация без СР		
Флотация с хлоридом натрия (концентрация NaCl 20,1 г/л)	0,1444	0,0024
Флотация с хлоридом натрия (концентрация NaCl 10,2 г/л)	0,0898	0,0015
Флотация с сульфатом алюминия (концентрация Al ₂ (SO ₄) ₃ 30 мг/л)	0,0450	0,0008
Флотация со СР		
Флотация со СР (размер частиц 0,0...0,1 мм)	0,2753	0,0046
Флотация со СР (размер частиц 0,1...0,5 мм)	0,3256	0,0054
Флотация со СР (размер частиц 0,5...2,0 мм)	0,2104	0,0035

Полученное уравнение кинетики флотации (29) является достаточно универсальным и может быть использовано для описания микрофлотационных процессов частиц различной степени дисперсности (от нескольких десятых долей микрометра до нескольких десятков микрометров).

Данное уравнение совпадает по форме с уравнением кинетики флотации (7), выведенным из химического закона действия масс. Проведенные нами экспериментальные исследования показали применимость этого уравнения для различных случаев флотации. Кинетические зависимости при использовании СР в качестве собирателя дисперсной фазы представлены на рис. 1, 2.

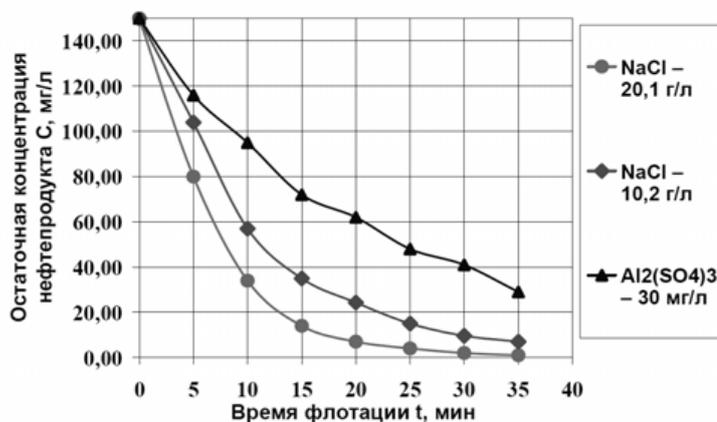


Рис. 1. Кинетические закономерности сорбционно-флотационного процесса при использовании электролитов (NaCl и $Al_2(SO_4)_3$)

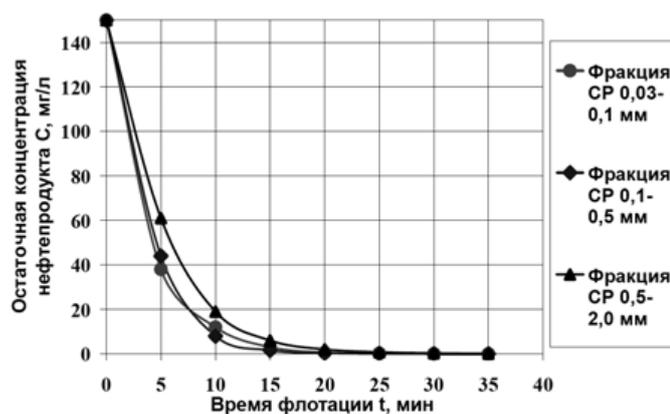


Рис. 2. Кинетические закономерности сорбционно-флотационного процесса при использовании СР с различным фракционным составом

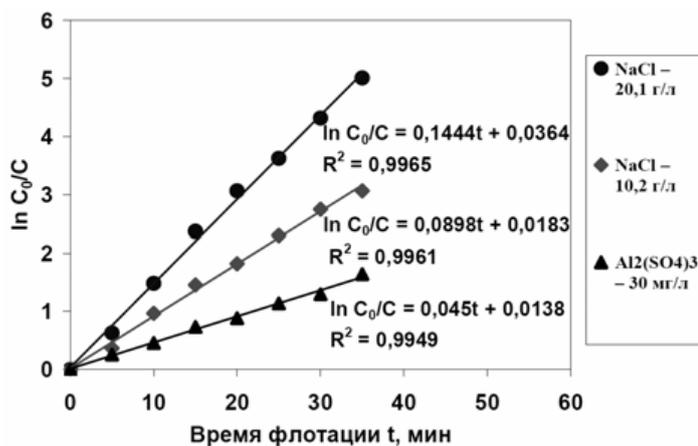


Рис. 3. Кинетические зависимости флотации в координатах $(\ln C_0/C - t)$ при использовании электролитов (NaCl и $Al_2(SO_4)_3$)

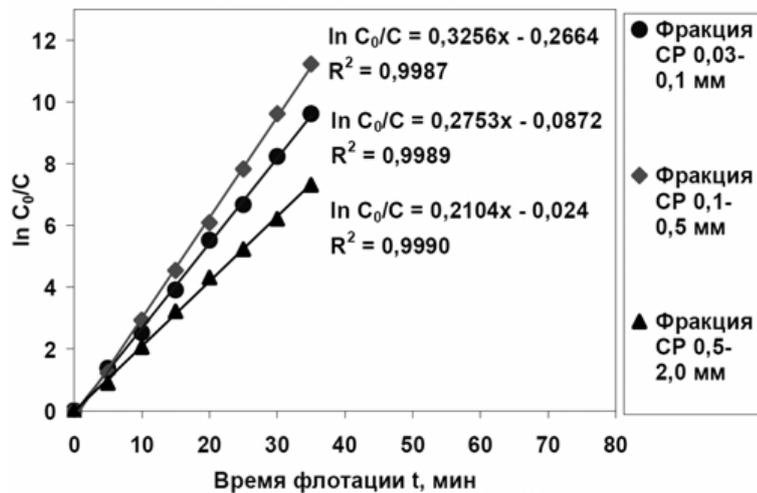


Рис. 4. Кинетические зависимости флотации в координатах ($\ln C_0/C$ — t) при использовании СП с различным фракционным составом

Значение констант флотации при использовании СП увеличивается с уменьшением размера частиц СП и составляет $0,2104 \dots 0,2753 \text{ мин}^{-1}$, что примерно в 2...6 раз больше, чем при использовании солей хлорида натрия и сульфата алюминия, использующегося традиционно в качестве коагулянта при очистке нефтесточков (табл. 2). Это объясняется тем, что именно при таком способе ведения флотационного процесса отсутствует электростатический барьер отталкивания и сводится к минимуму влияние сольватного фактора стабилизации. Фактически процесс сводится к чисто диффузионному, то есть время адсорбционной релаксации намного меньше времени диффузионной релаксации ($\tau_{\text{адс}} \ll \tau_{\text{диф}}$).

Исследования флотации со СП (фракции 0,03...0,5 мм, расход 100...150 мг/л) на лабораторной установке на реальных нефтесодержащих сточных водах с концентрацией по нефтепродуктам 150...300 мг/л показали, что остаточная концентрация нефтепродуктов составляет через 20 мин 5...6 мг/л, через 40 мин — 2...4 мг/л.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андреев С. Ю. Интенсификация работы канализационных очистных сооружений с использованием диспергированных водовоздушных смесей: дис... д-ра техн. наук. Пенза, 2007. 331 с.
2. Москвичева Е. В. Ресурсосберегающие процессы как основа экологически чистых технологий гальванического хромирования из водных и неводных сред: дис... д-р техн. наук. М., 1998. 358 с.
3. Переработка отходов производства во вторичное сырье как одно из условий обеспечения промышленной безопасности на предприятии / Е. В. Москвичева, П. А. Сидякин, Д. В. Щитов, Д. О. Игнаткина // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2014. Вып. 37(56). С. 204—211.
4. McGarry M. G., Tongkasame C. Water Reclamation and Algae Harvesting // Journal (Water Pollution Control Federation). 1971. Vol. 43. № 5. Pp. 824—835.
5. Очистка нефте- и фенолсодержащих вод методом электрообработки / Л. Г. Иванова, В. Д. Сидоренко, И. А. Удовенко, Л. В. Кумчий // Журнал прикладной химии. 1976. Т. 49. № 2. С. 424—430.
6. Holdig I. C. Polshuig sewage effluents // Effluents and Water Treatment Journal. 1972. № 12. Pp. 665—672.

7. Очистка сточных вод с использованием смешанного реагента, полученного из нефтяного отхода / Е. В. Москвичева, А. А. Сахарова, Ю. Н. Гончар, Д. О. Игнаткина, Т. А. Кузьмина // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2013. Вып. 34(53). С. 114—120.
8. *Рубинштейн Ю. Б., Филлипов Ю. А.* Кинетика флотации. М.: Недра, 1980. 375 с.
9. *Webb C., Black G. M., Atkinson B.* Process Engineering Aspects of Immobilised Cell Systems. Rugby: Institution of Chemical Engineers Publications, 1986. 769 p.
10. Гидрофобизированный вспученный перлит — флотационный собиратель эмульгированных масел / Ю. И. Тарасевич, Л. К. Патюк, А. А. Панасевич и др. // Химия и технология воды. 1985. Т. 7. № 6. С. 35—37.
11. *Фрумкин А. Н.* Физико-химические основы теории флотации. М.: АН СССР, 1932. 12 с.
12. *Jia-Qian N.J.D. Graham, C. Harward.* Coagulation of upland coloured water with polyferic sulphate compared to conventional coagulants // J. Water SRT — Aqua. 1996. Vol. 45. № 3. Pp. 143—154.
13. Process Engineering Aspects of Immobilised Cell Systems / J. G. Anderson, C. Webb, G. M. Black, B. Atkinson (eds.). Rugby: Institution of Chemical Engineers Publications, 1986. 153 p.
14. Pat. US 4728404, 1.03.1988. Process for the separation of emulsions containing water as a continuous phase and device for the application of the process.
15. *Свиридов В. В.* Закономерности очистки воды от масел и нефтепродуктов с помощью сорбционно-коалесцирующих материалов: дис... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2005. 202 с.

© Москвичева Е. В., Москвичева А. В., Игнаткина Д. О., Сидякин П. А., Щитов Д. В., 2015

Поступила в редакцию
в феврале 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Кинетическая модель флотации с использованием смешанного реагента на основе отхода производства / Е. В. Москвичева, А. В. Москвичева, Д. О. Игнаткина, П. А. Сидякин, Д. В. Щитов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 40(59). С. 45—57.

Об авторах:

Москвичева Елена Викторовна — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, viv_vgasu@mail.ru

Москвичева Анастасия Владимировна — канд. техн. наук, доц. кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, viv_vgasu@mail.ru

Игнаткина Дарья Олеговна — аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, viv_vgasu@mail.ru

Сидякин Павел Алексеевич — канд. техн. наук, доц., проф. кафедры строительства, Филиал Северо-Кавказского федерального университета в г. Пятигорске. Российская Федерация, 355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, sidyakin_74@mail.ru

Щитов Дмитрий Викторович — канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой строительства, Филиал Северо-Кавказского федерального университета в г. Пятигорске. Российская Федерация, 355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, skfu.pgs@gmail.com

E. V. Moskvicheva, A. V. Moskvicheva, D. O. Ignatkina, P. A. Sidyakin, D. V. Shchitov

KINETIC MODEL OF FLOTATION USING A MIXED REAGENT ON THE BASIS OF PRODUCTION WASTE

This article explores the opportunity and determines the optimal parameters of the process of flotation water purification from emulsified oil products with the help of the developed mixed reagent, obtained on the basis of oil wastes structured by polymer wastes. The authors present the results on the use of the mixed reagent as sorption-coalescing load, which increases the efficiency of the

flotation water treatment from oily substances, i. e. residual concentration is reduced compared to a conventional flotation. Basic laws that can be used to calculate the technological devices and to determine the mechanism of flotation-sorption methods are revealed. Fairly universal equation of kinetics flotation, which may be used to describe micro-flotation processes of particles of different dispersion are received. The process of flotation with mixed reagent in a laboratory unit in real oily wastewater is investigated.

Key words: oil products, waste water treatment, flotation, flotation-sorption method, mixed reagent, flotation rate, fractional composition.

REFERENSES

1. Andreev S. Yu. *Intensifikatsiya raboty kanalizatsionnykh ochistnykh sooruzhenii s ispol'zovaniem dispergirivannykh vodovozdushnykh smesei: dis... d-ra tekhn. nauk* [Intensification of running of sewage treatment facilities with the use of dispersed air-to-water mixes. Dis. Dr. Eng. Sci.]. Penza, 2007. 331 p.
2. Moskvicheva E. V. *Resursosberegayushchie protsessy kak osnova ekologicheskoi chistykh tekhnologii gal'vanicheskogo khromirovaniya iz vodnykh i nevodnykh sred* [Resource-saving processes as basis of environmentally friendly technologies of galvanic chrome plating from water and non-aqueous environments. Dr. Eng. Sci. Diss.]. Moscow, 1998. 358 p.
3. Moskvicheva E. V., Sidiyakin P. A., Shchitov D. V., Ignatkina D. O. [Recycling of production waste into secondary raw materials as one of the conditions to ensure industrial safety at enterprise]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2014, iss. 37(56), pp. 204—211.
4. McGarry M. G., Tongkasame C. Water Reclamation and Algae Harvesting. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 1971, 43(5), pp. 824—835.
5. Ivanova L. G., Sidorenko V. D., Udovenko I. A., Kumchii L. V. [Purification of oil- and phenol-containing waters by electrical processing]. *Zhurnal prikladnoi khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 1976, 49(2), pp. 424—430.
6. Holdiug I. C. Polshuiug sewage effluents. *Effluents and Water Treatment Journal*, 1972, no. 12, pp. 665—672.
7. Moskvicheva E. V., Sakharova A. A., Gonchar Yu. N., Ignatkina D. O., Kuz'mina T. A. [Wastewater treatment by mixed reagent derived from petroleum wastes]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2013, iss. 34(53), pp. 114—120.
8. Rubenstein Yu. B., Fillipov Yu. A. *Kinetika flotatsii* [Flotation kinetics]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 375 p.
9. Webb C., Black G. M., Atkinson B. *Process Engineering Aspects of Immobilised Cell Systems*. Rugby, Inst. of Chem. Eng. Publ., 1986. 769 p.
10. Tarasevich Yu. I., Patyuk L. K., Panasevich A. A. [Hydrophobized expanded perlite — floatation collector of emulsified oils]. *Khimiya i tekhnologiya vody* [Journal of Water Chemistry and Technology], 1985, 7(6), pp. 35—37.
11. Frumkin A. N. *Fiziko-khimicheskie osnovy teorii flotatsii* [Physical and chemical principals of the theory of flotation]. Moscow, AS USSR Publ., 1932. 12 p.
12. Jia-Qian N.J.D. Graham, C. Harward. Coagulation of upland coloured water with polyferric sulphate compared to conventional coagulants. *J. Water SRT — Aqua*, 1996, 45(3), pp. 143—154.
13. Anderson J. G., Webb C., Black G. M., Atkinson B. (eds.). *Process Engineering Aspects of Immobilised Cell Systems*. Rugby, Inst. of Chem. Eng. Publ., 1986. 153 p.
14. *Pat. US 4728404, 1.03.1988*. Process for the separation of emulsions containing water as a continuous phase and device for the application of the process.
15. Sviridov V. V. *Zakonomernosti ochistki vody ot masel i nefteproduktov s pomoshch'yu sorbtionno-koalestsiruyushchikh materialov: dis... kand. tekhn. nauk* [Regularities of water purification from oils and oil products by means of sorption-coalescing materials. Diss. Cand. Eng. Sci.]. Ekaterinburg, 2005. 202 p.

For citation:

Moskvicheva E. V., Moskvicheva A. V., Ignatkina D. O., Sidyakin P. A., Shchitov D. V. [Kinetic model of flotation using a mixed reagent on the basis of production waste]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 40(59), pp. 45—57.

About authors:

Moskvicheva Elena Viktorovna — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru

Moskvicheva Anastasia Vladimirovna — Candidate of Engineering Science, Docent of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru

Ignatkina Dar'ya Olegovna — Postgraduate student of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, viv_vgasu@mail.ru

Sidyakin Pavel Alekseevich — Candidate of Engineering Science, Docent, Professor of Construction Department, Branch of North-Caucasian Federal University in Pyatigorsk. 1, Pushkina St., Stavropol', 355009, Russian Federation, sidyakin_74@mail.ru.

Shchitov Dmitrii Viktorovich — Candidate of Engineering Science, Docent, Head of Construction Department, Branch of North-Caucasian Federal University in Pyatigorsk. 1, Pushkina St., Stavropol', 355009, Russian Federation, skfu.pqs@gmail.com.

УДК 69.504 + 711.4:504

В. В. Балакин

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ЛАНДШАФТНО-СРЕДОЗАЩИТНОГО ОЗЕЛЕНЕНИЯ НА ГОРОДСКИХ ДОРОГАХ И УЛИЦАХ

В качестве факторов техногенного воздействия на городскую среду рассматриваются загрязнение атмосферного воздуха выбросами автомобильного транспорта и транспортный шум. Анализируются результаты натурных наблюдений и физического моделирования рассеяния отработавших газов полосами зеленых насаждений разной конструкции на городских дорогах и улицах. Приводятся породный состав и конструктивные характеристики полос озеленения, усиливающих эффекты рассеяния выбросов автомобилей и снижения шума. Даются рекомендации по формированию линейно-полосных структур ландшафтно-средозащитного озеленения, обеспечивающих оптимизацию и доведение до нормативных пределов факторов дискомфорта на территории жилой застройки.

К л ю ч е в ы е с л о в а: выбросы автомобилей, транспортный шум, зеленые насаждения, поглощение, рассеяние, газозащитная эффективность, шумозащитный эффект, ширина полосы, конструкция посадок.

В городском ландшафте, весьма сложном и неоднородном по своей внутренней структуре, наряду с его основными видами, формируемыми в пределах специализированных типов городских земель, — жилой, общественно-деловой, производственной, природной — выделяется «особый вид антропогенного ландшафта» [1] на участках прохождения трассы транспортных магистралей и других объектов транспортной инфраструктуры.

Формирование объектов озеленения на транспортных территориях, особенно подверженных техногенному воздействию, органично связано с решением наиболее общей задачи «реконструкции, конструирования и восстановления урбанизированных ландшафтов» [2]. На магистральных улицах зеленые насаждения являются тем единственным средством, с помощью которого достигается гармонизация «жестких ландшафтов» со сплошной безликой застройкой и ограниченным растительным покровом путем «стирания границ между архитектурой и природой», и возвращается им «мягкость» [3] с улучшением эстетики и повышением привлекательности.

Кроме этого, зеленые насаждения являются важным компонентом городского пространства, принимающим в сочетании с травяным покровом и почвой участие в процессах накопления, трансформации и выведения из городской среды атмосферных загрязнений.

Газы не только накапливаются в листьях и хвое растений, но и подвергаются транслокации по органам, а также удаляются в корни и почву. Древесно-кустарниковые насаждения могут усваивать и вовлекать в метаболизм веществ диоксид серы, оксиды азота, аммиак и другие ингредиенты, вредные для здоровья человека [4, 5].

Вместе с этим зеленые насаждения являются эффективным средством защиты от шума. В среднем кроны поглощают 25 % звуковой энергии и примерно 75 % этой энергии отражают и рассеивают [4].

Также огромна роль зеленых насаждений в обогащении воздуха кислородом и поглощении углекислого газа, уменьшении бактериальной загрязненности и повышении степени ионизации атмосферы.

Защитная роль полос зеленых насаждений особенно велика на автомагистралях, отличающихся от других источников техногенного воздействия на городскую среду высокими шумовыми характеристиками и выделением вредных выбросов на небольшой высоте непосредственно в зону дыхания людей и в жилую застройку.

Многочисленные исследования показывают, что средствами планировки, озеленения и благоустройства вполне осуществимо, при одновременном повышении уровня эстетики городской среды, решение задач регулирования, оптимизации и доведения до нормативных пределов таких факторов дискомфорта, как загазованность атмосферного воздуха, транспортный шум, пылевое загрязнение среды, неудовлетворительный аэрационный режим жилой застройки [4, 6—12].

В системе озеленения города А. В. Городковым [13] выделен типологический ряд объектов средозащитного назначения, среди которых наиболее детального изучения требуют, на наш взгляд, линейно-полосные структуры комплексного средозащитного воздействия в виде непрерывных прямолинейных и криволинейных участков насаждений, формируемых в пределах разделительных полос городских дорог и улиц, а также на придорожной территории. Здесь следует учесть, что сложившиеся к настоящему времени «приемы и традиции в озеленении городов, а также ландшафтно-эстетические принципы их проектирования» еще не в полной мере обеспечивают экологическое благополучие и комфорт на примагистральных территориях.

Основой для разработки принципиальных конструктивно-планировочных приемов линейно-полосных структур зеленых насаждений могут стать результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных как по отдельным средоформирующим факторам, так и по их сочетаниям. Результат успешной реализации средозащитного потенциала таких полос насаждений будет выражаться в их оптимальной планировочной позиции по отношению к транспортному потоку как источнику дискомфорта, а также выборе структуры, конструкции и породного состава, достигнутой степени гармонизации и эстетической выразительности ландшафта в общем композиционно-планировочном решении примагистральной территории.

Приемы озеленения, применяемые в пределах урбанизированных территорий, должны ориентировать как реконструируемые существующие, так и вновь проектируемые насаждения на максимально возможную реализацию их средозащитных свойств. Это становится возможным в том случае, если проектировщик располагает количественными показателями, определяющими возможности снижения негативного воздействия транспортных потоков на жилую среду путем выбора оптимальной конструкции и регулирования геометрических параметров объектов ландшафтно-средозащитного озеленения.

При многофакторном негативном воздействии транспортного потока следует, прежде всего, выделить доминирующий экологический фактор и определить имеющиеся ресурсы снижения его влияния на городскую среду приемами озеленения при достаточно ограниченных по объективным причинам других средствах.

Натурные наблюдения и анализ градостроительной проектной практики показывают, что в качестве доминирующих факторов в условиях, как правило, переуплотненной современной застройки магистральных улиц выступают загазованность и аэрационный режим, между которыми существует функциональная связь [14]. Поэтому снижение влияния этих факторов на качество среды обитания градостроительными средствами является первостепенной научной задачей.

Снижение уровня загрязнения воздуха полосами зеленых насаждений на магистральных улицах происходит частично путем поглощения отдельных компонентов отработавших газов (ОГ) автомобилями листвою [4], а также — и в основном — благодаря их рассеянию в верхние слои атмосферы за счет аэродинамических свойств посадок [12]. Поэтому высота, форма и плотность крон деревьев и кустарников, шаг посадки в ряду и величина междурядий должны соответствовать оптимальной конструкции формируемых средозащитных полос с точки зрения рассеяния атмосферных загрязнений.

В связи с этим нашей задачей явилось изучение закономерностей рассеяния ОГ примагистральными полосами зеленых насаждений разной конструкции. Исследования газозащитных свойств полос зеленых насаждений проведены на полигоне крупномасштабного городского моделирования и в натуральных условиях на улицах Волгограда.

Исследования показали, что снижение концентрации ОГ зелеными насаждениями на магистрали в значительной мере зависит от двух показателей: плотности полосы и ее высоты. Эта зависимость представлена на рис. 1. Показатели газозащитной эффективности полос зеленых насаждений разной конструкции приведены в таблице. Здесь приведен коэффициент ажурности — отношение площади, занимаемой стволом, ветвями и листвою деревьев и кустарников, к общей площади фронтальной проекции защитной полосы зелени.

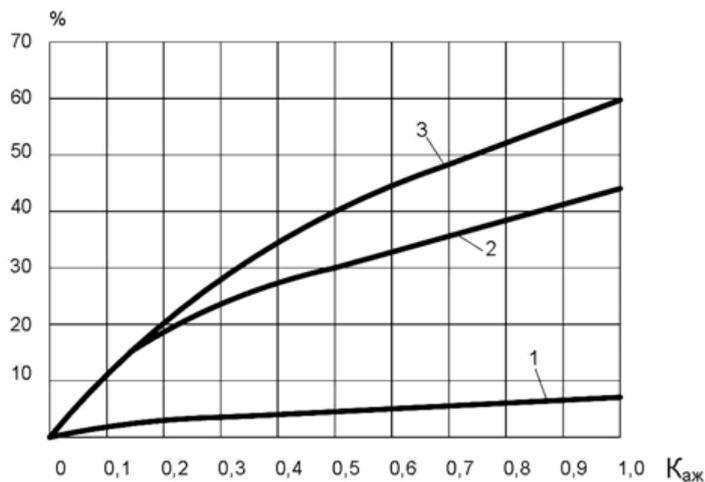


Рис. 1. Зависимость газозащитной эффективности полос зеленых насаждений от их ажурности и высоты. По оси абсцисс — коэффициент ажурности; по оси ординат — снижение концентрации оксида углерода (CO), %; 1 — $h = 1,6$ м; 2 — 9 м; 3 — 14 м. h — высота полосы зеленых насаждений

По ходу кривых на рис. 1 видно, что с увеличением густоты посадок газозащитное действие их сначала резко повышается, а затем наблюдается менее интенсивное снижение концентрации СО. Это следует учитывать при выборе конструкции защитных полос зеленых насаждений в тех случаях, когда ширина улиц при наличии технической полосы для прокладки инженерных сетей не позволяет создавать древесно-кустарниковые насаждения с коэффициентом ажурности, близким к 1.

Газозащитная эффективность полос зеленых насаждений на автомагистралях (по данным натурных наблюдений)

Тип посадки	Высота, м	Ширина, м	Коэффициент ажурности	Газозащитная эффективность, %
Однорядная посадка деревьев с однорядным кустарником	5...8	4...6	0,2...0,4	17...28
	8...10			18...29
	10...15			20...32
	15...20			22...34
Двухрядная посадка деревьев с однорядным кустарником	5...8	6...8	0,3...0,6	23...27
	8...10			24...38
	10...15			26...42
	15...20			28...45
Двухрядная посадка деревьев с двухрядным кустарником	5...8	8...10	0,4...0,7	28...41
	8...10			29...43
	10...15			32...47
	15...20			34...50
Трех-четырёхрядная посадка деревьев с двухрядным кустарником	5...8	10...15	0,5...0,8	33...45
	8...10			34...47
	10...15			37...51
	15...20			40...55
Пяти-шестирядная посадка деревьев с четырехрядным кустарником	5...8	20...30	0,7...1,0	37...48
	8...10			38...50
	10...15			42...55
	15...20			45...65

В таких условиях необходимо стремиться к размещению между проезжей частью и жилой застройкой в пределах разделительных полос зеленых насаждений такой плотности и высоты, которые соответствуют отрезку наиболее крутого подъема кривой газозащитной эффективности.

В условиях открытого пространства с удалением вглубь примагистральной территории в направлении, перпендикулярном дороге (рис. 2, а), концентрация СО на высоте 1,5 м определяется по формулам:

$$\text{при } x \leq 30 \text{ м} \quad q_x = q_0 e^{-0,0413x}, \quad (1)$$

$$\text{при } x > 30 \text{ м} \quad q_x = 0,29q_0 - 0,14(x - 30), \quad (2)$$

где x — расстояние от края проезжей части до точки наблюдения, м.

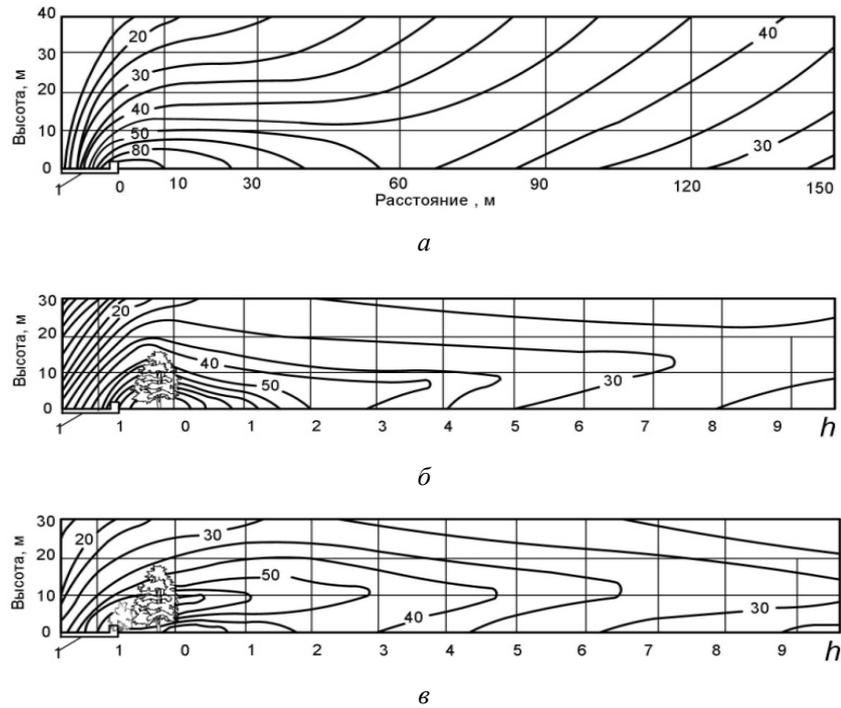


Рис. 2. Распространение выбросов автомобилей на примагистральной территории в условиях открытого пространства (*a*) и при наличии экранов: *б* — однодвухрядная посадка деревьев продуваемой конструкции; *в* — двух-трехрядная посадка деревьев с кустарником плотной конструкции; *l* — проезжая часть. Цифры и изолинии — концентрации оксидов азота ($\text{NO} + \text{NO}_2$), % от начального уровня; *h* — высота полосы

По характеру изолиний на рис. 2, *б* и *в* видно, что полосы зеленых насаждений представляют собой полупрозрачные экраны, через которые часть загрязнений проходит вместе с воздушным потоком, а другая отклоняется в верхний слой атмосферы и более эффективно рассеивается.

С учетом этого эффекта выражения (1) и (2) изменяются следующим образом:

$$\text{при } x \leq 30 \text{ м} \quad q_x = q_0 \left(1 - \frac{\omega}{100} \right) e^{-0,0413x}, \quad (3)$$

$$\text{при } x > 30 \text{ м} \quad q_x = 0,29q_0 \left(1 - \frac{\omega}{100} \right) - 0,14(x - 30), \quad (4)$$

где ω — газозащитная эффективность полос зеленых насаждений, %, определяемая по формуле:

$$\omega = (1 - q_3/q_0) 100, \quad (5)$$

здесь q_0 и q_3 — концентрации компонентов ОГ перед экраном и за экраном, мг/м^3 .

В общем случае снижение концентрации $\text{NO} + \text{NO}_2$, % полосой зеленых насаждений плотной, равномерно ажурной или продуваемой снизу конструк-

ции при обособленном расположении, а также в сочетании с торцевой (строчной) и свободной застройкой улицы определяется по формуле

$$\omega = 48(1 + 0,016h)K_{аж}^{\frac{2}{3}}, \quad (6)$$

где h — высота полосы, м; $h \geq 5$; $K_{аж}$ — коэффициент ажурности.

Наиболее выгодной по конструкции является непродуваемая полоса с коэффициентом ажурности в нижнем ярусе 0,7...1 при постепенном уменьшении плотности к вершине в пределах оптимального значения согласно рис. 1.

С увеличением густоты и ширины посадок соотношение просачивающейся беспрепятственно и переваливающей через полосу частей газозвдушной смеси уменьшается, а при максимальной плотности растений поток практически полностью огибает преграду сверху, которая может уже рассматриваться как непрозрачный жесткий экран ($K_{аж} = 1$). Газозащитный эффект у такой полосы при одинаковой высоте и тех же значениях коэффициента ажурности на 30 % больше, чем у полосы продуваемой конструкции. Причем наиболее низкий уровень загазованности наблюдается непосредственно за полосой — в зоне пешеходного движения вдоль дороги.

Однако в пределах самой посадки концентрации $NO + NO_2$ оказываются более высокими, чем на открытой территории из-за резкого снижения скорости ветра. Следует заметить, что в данном случае отдельные компоненты выбрасываемой над проезжей частью смеси газов теряют свою динамическую индивидуальность, так как благодаря турбулентной диффузии и быстрому охлаждению удельные веса и плотности ОГ и атмосферного воздуха «становятся весьма близкими» [15]. Поэтому можно считать, что любая газообразная примесь, так же как и оксиды азота, будет задерживаться в полосе, которая в данном случае, подобно лесному массиву, «начинает играть роль накопителя загрязняющего вещества» [16].

Кроме этого, при формировании полосы в виде вертикальной стены в уличном пространстве появляется устойчивая обратная циркуляция воздушного потока [17], вследствие чего «происходит процесс накопления выбросов автотранспорта над автомобильной дорогой из-за близкого расположения первых рядов деревьев» [18].

Изложенное позволяет заключить, что для эффективной защиты территории жилой застройки от проникания с проезжей части магистрали ОГ она должна быть экранирована от транспортного потока плотными древесно-кустарниковыми насаждениями. При многорядных посадках деревьев ближайший ряд от проезжей части у полосы плотной конструкции должен быть представлен кустарниками, а затем деревьями меньшей высоты с низким штамбом и густосомкнутыми кронами. В последующих рядах полосы высота посадок увеличивается.

Следует иметь в виду, что газозащитное влияние плотных непродуваемых и ажурных полос зеленых насаждений усиливается с увеличением их высоты (рис. 1). Поэтому для расширения зоны защитного действия необходимо включать в состав таких полос высокорастущие деревья [9].

Здания, располагающиеся фронтально к набегающему воздушному потоку, существенно деформируют поле концентрации загрязняющих веществ в зонах влияния полос зеленых насаждений разных конструкций (рис. 3).

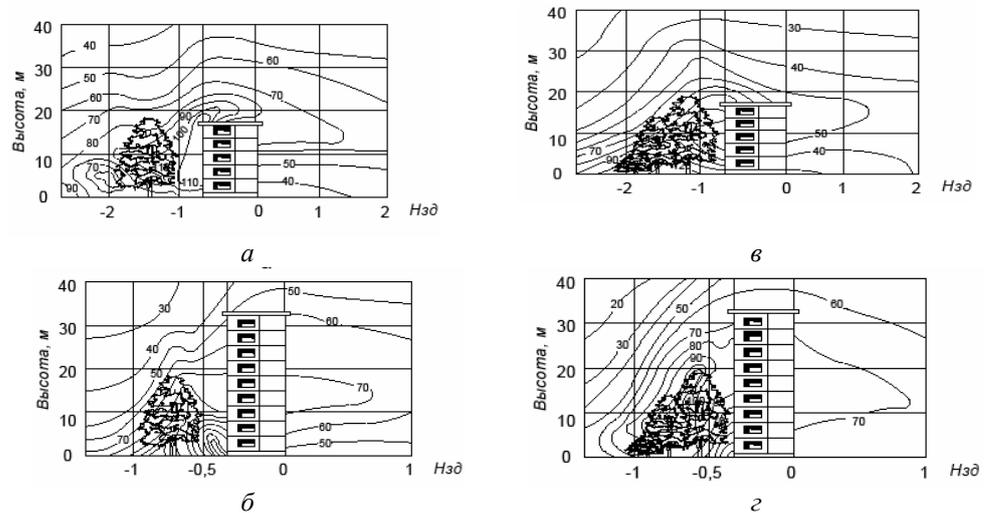


Рис. 3. Рассеяние выбросов автомобилей в условиях моделирования в системе «зеленая полоса — здание» с полосами продуваемой (а — при $h = H$, б — при $h = 0,5H$) и плотной конструкции (в — при $h = H$, г — при $h = 0,5H$). Цифры и изолинии — концентрации $\text{NO} + \text{NO}_2$, % от начального уровня (за 100 % принят уровень загрязнения воздуха над краем проезжей части магистрали с подветренной стороны); h — высота полосы; H — высота здания

Как следует из формулы (6), газозащитная эффективность системы «зеленая полоса — здание» как жесткого экрана ($K_{\text{эж}} = 1$) может достигать при 5...9-этажной односторонней застройке улицы 60...70 %.

Исследования на моделях показали, что максимальное снижение загазованности атмосферного воздуха в зоне пешеходного движения и у нижних этажей зданий по их наветренному фасаду наблюдается при достижении посадками высоты, равной половине высоты здания. Полоса непродуваемой конструкции (рис. 3, г) снижает концентрации оксидов азота от 130...150 до 20 % в пешеходной зоне и от 100...150 до 20...90 % в пределах нижних этажей девятиэтажного здания.

Однако в случае двусторонней застройки многосекционными зданиями с минимальными разрывами в ряду в уличном пространстве появляется устойчивая замкнутая циркуляция примесей.

Это согласуется с данными натурных наблюдений Венегаса и Массео [19] и результатами расчета с использованием модели транспортного потока Paramics [20], из которых следует, что из-за вихревых потоков в уличном каньоне концентрации CO оказываются более низкими у наветренных стен подветренного ряда зданий, чем у подветренных стен первого по потоку ряда зданий. В данном случае ветер, дующий над крышами слева направо, вызывает образование рециркуляционного вихревого потока, увлекающего загрязняющие вещества на дне каньона улицы в направлении справа налево.

Нильсен в своей работе уточняет [21], что наибольшие значения концентрации загрязняющих веществ отмечаются обычно у нижней части подветренной стены наветренного здания. А с увеличением высоты наблюдается экспоненциальное уменьшение концентрации у стены из-за сильного восходящего потока [22, 23].

Другие исследователи, анализируя движение воздушных потоков, загрязненных выбросами автомобильного транспорта, также приходят к выводу, что полузамкнутые объемы в виде глубоких каньонов существенно сдерживают рассеяние примесей, поскольку возникающие на их поперечном профиле квазистационарные вихри разного масштаба и направления вращения обуславливают повышенное загрязнение воздуха со стороны подветренных фасадов наветренного ряда зданий [24—27].

Зеленые насаждения в подобных случаях не должны препятствовать воздухообмену на улицах. Высоту полос ажурной и плотной непродуваемой конструкции в таких условиях необходимо ограничивать до уровня середины фасадов зданий путем проведения систематических рубок, ухода, омоложения, стрижек. Поэтому участки магистралей со сплошной фронтальной застройкой необходимо озеленять такими породами деревьев, которые легко переносят обрезку стволов и дают много побегов на штамбах. Наилучшее время рубок — летний период, когда деревья и кустарники находятся в облиственном состоянии, что позволяет правильно отбирать ветви для удаления.

В сочетании с застройкой более эффективными по отношению к зоне пешеходного движения и внешним фасадам зданий оказываются полосы продуваемой конструкции. В данном случае при $h = 0,5H$ стимулируется интенсивный турбулентный обмен в тротуарной части между полосой и зданием (рис. 3, б), а при $h = H$ отмечается более умеренное загрязнение атмосферного воздуха перед полосой и обеспечивается равномерное распределение компонентов ОГ по фасаду здания (рис. 3, а).

Газозащитный эффект системы «зеленая полоса — здание» существенно зависит как от конструкции полос зеленых насаждений и этажности зданий, так и от их взаимного приближения. В зоне пешеходного движения, т. е. между полосой и застройкой, газозащитный эффект может быть установлен по следующей формуле:

$$\omega = 57 \left[\frac{11b^{0,22} \left(1 + 2,63K_{\text{аж}}^{\frac{1}{3}} \right) h^{1,65}}{H^{1,87} e^{3,34h/H}} \right] - 1, \quad (7)$$

где b — расстояние от бордюра до линии застройки, м; H — высота здания, м ($0,2 \leq \frac{h}{H} \leq 1$).

По мере приближения высоты деревьев к высоте зданий отмечается дополнительное снижение загазованности воздуха на внутриквартальной территории за счет увеличения траектории движения и рассеяния примесей в верхнем слое атмосферы (рис. 3, а, в). При равенстве высот полосы и здания отмечается максимальное снижение концентраций ОГ, которое составляет по

дворовому фасаду 20 % для продуваемой и 50 % для плотной конструкции от уровня загрязнения, фиксируемого без озеленения.

Однако в данном случае плотные посадки в сочетании с застройкой, проявляя более высокие показатели газозащитной эффективности по отношению к дворовому пространству с увеличением высоты, выступают в качестве вторичного источника загрязнения воздуха накапливаемыми примесями, которые дрейфуют в пределах полосы и тротуарной части с незначительной скоростью (рис. 3, в, г). Поэтому такие полосы следует применять как в обособленном варианте, так и в сочетании с застройкой нежилого назначения на отдельных участках магистральных дорог и улиц для защиты от негативного воздействия уличного транспорта территории, застроенной жилыми зданиями.

Наибольший эффект защиты от шума наблюдается при густых посадках с плотной кроной деревьев и кустарников, где снижение звука происходит за счет отражения, поглощения и трансформации частот звуковых колебаний. При прохождении звуковых волн через шумозащитные полосы зеленых насаждений снижение звука происходит пропорционально их биомассе [4]. Акустический эффект здесь определяют такие факторы, как конструкция, дендрологический состав и ширина полосы, которая на магистральных улицах и дорогах, проходящих вблизи линий регулирования застройки, обычно не превышает 30 м.

Эффект снижения шума полосой такой ширины при 7...8-рядной посадке деревьев в шахматной конструкции с кустарником в двухъярусной живой изгороди и подлеском составляет 8...9 дБА¹. Такие же показатели получены в результате наблюдений на улицах г. Саратова [28] группа тополей с пирамидальной формой кроны может снизить уровень шума на 9...10 дБА летом и на 5...7 дБА зимой.

Из приведенных источников следует, что снижение шума полосами зеленых насаждений, включаемыми в поперечный профиль улиц, не превышает 10 дБА. Это означает, что при обычно наблюдаемой шумовой характеристике транспортного потока на магистральных улицах (75...80 дБА) превышение нормативного уровня звука для дневного времени на территории жилой застройки (55 дБА — СП 51.13330.2011 «Защита от шума») будет составлять 20...25 дБА. Поэтому эффективность зеленых насаждений на улицах как шумозащитных средств не следует переоценивать — здесь они могут использоваться лишь «в качестве дополнительных средств защиты от шума»².

К такому же выводу приходит А. С. Прохода, утверждая [29], что «в условиях реальной планировки крупных городов с высокой плотностью застройки зеленые насаждения не могут заметно влиять на уровни шума в первом эшелоне зданий (ближайшем к проезжей части)».

Очевидно, наибольшую эффективность шумозащитное озеленение будет проявлять на участках дорог, проходящих на значительном удалении от жилой застройки, достаточном для формирования широких многорядных полос. Например, на КАД в Санкт-Петербурге доля таких участков с шумозащит-

¹ Руководство по учету в проектах планировки и застройки городов требований снижения уровней шума / ЦНИИП градостроительства Госгражданстроя. М.: Стройиздат, 1984. 46 с.

² Там же.

ными полосами озеленения длиной от 60 до 1700 м достигает 25 % от всей протяженности акустических преград [30].

Максимальный шумозащитный эффект дают полосы с плотной кроной деревьев, отличающейся большим удельным весом «зеленой массы» [6]. Густосомкнутые, массивные кроны снижают уровень звука на 15...18 дБА, причем наибольший эффект отмечается на первых 10...15 м посадки [4] и почти не возрастает с увеличением ширины объекта озеленения от 20 до 40 м [6]. Поэтому наиболее загущенные ряды деревьев и кустарников целесообразно располагать со стороны магистрали. При этом следует использовать прием шахматной посадки деревьев, большая эффективность которого доказана в работе М. М. Болховитиной [31]. По ее убеждению, полоса с расположением деревьев в шахматном порядке при расстоянии между ними не более 4 м и высоте не менее 5...8 м при высоте кустарника 1,5...2 м обеспечивает снижение шума на 3...4 дБА больше, чем полоса с обычной рядовой конструкцией посадки растений.

Более эффективными являются полосы, имеющие форму чередующихся сплошных плоскостей в виде «стен», состоящих из плотных рядов деревьев с прозрачностью кроны не более 0,2 и кустарников. На каждой плоскости полосы потеря уровня звукового давления составляет 1,5...2 дБА. Поэтому растительные массивы, с учетом потерь энергии на пути распространения звука и затухания дифрагирующих звуковых волн, попадающих на большую поверхность, рекомендуется расчленять на составные части [7].

На территории шириной 50...75 м вместо одной сплошной следует размещать 2...3 противозумовые полосы с разрывами между ними не менее высоты насаждения. В этом случае звуковая энергия будет гаситься за счет прохождения ее через среды различных плотностей. Кроме того, уровень шума уменьшится вследствие отражения от зеленых экранов (рядов полос) и распространения его по зеленым коридорам в пределах подкоронового пространства. Чем больше полос, тем эффективнее будет действовать формируемая таким путем зеленая система.

В данном случае расчет величины снижения уровня шума рекомендуется производить по формуле, предложенной Майстером и Рурбергом [7]:

$$L_n = 20 \lg (d + \sum B_m + \sum A_m) / d + 1,5 z + \beta_m \sum B_m, \quad (8)$$

где L_n — ожидаемый уровень шума за полосой зеленых насаждений, дБ; d — расстояние от источника до фронта шумозащитной полосы, м; z — количество рядов; B_m — ширина каждой полосы, м; A_m — ширина разрывов между полосами, м; $\beta_m = (0,13...0,16)$ дБ/м — удельное поглощение звука в кронах деревьев и кустарников.

Исследования, выполненные В. В. Цыганковым на автомобильных дорогах пригородной зоны г. Брянска [6], показали, что наиболее эффективными являются специальные плотные линейно-полосные структуры из древесно-кустарниковых насаждений — крупномерных, быстрорастущих, с густоветвящейся низко опущенной плотной кроной. При этом подкороновое пространство должно быть закрыто кустарником в виде живой изгороди или подлеска.

Полоса зеленых насаждений шириной 25...30 м, сформированная из обособленных рядов деревьев (5...6 рядов) с подлеском и кустарником, дает снижение шума около 1,8 дБА на каждый ряд.

Для специальных шумозащитных полос следует подбирать 1...2 породы деревьев с массивной кроной. Желательно в плане такую полосу располагать по зигзагообразной линии, которая увеличивает площадь отражения звуковой энергии.

Хвойные породы зеленых насаждений по сравнению с лиственными более эффективны по шумозащитным свойствам, которые практически не изменяются у них в течение года. Поэтому целесообразно включать в состав посадок деревья и кустарники вечнозеленые породы (туя западная, можжевельники, сосна, ель и др.). В качестве основных и дополнительных пород при этом могут быть клен остролистный, вяз обыкновенный, тополь бальзамический (в шахматной конструкции посадок) с кустарником в двухъярусной живой изгороди и подлеском (из спиреи калинолистной, жимолости татарской, акации желтой, дерна белого, клена татарского).

Насаждения для озеленения улиц и дорог должны быть достаточно газустойчивыми и способными поглощать вредные вещества. В связи с этим при корректировке видового состава кустарников и деревьев рекомендуется высаживать клен полевой, тополя серебристый и черный, каштан конский, кизильник, боярышники, бересклет, пузыреплодник, снежноягодник [32].

При подборе состава насаждений в средозащитных полосах необходимо также учитывать конкурентные взаимоотношения отдельных пород между собой в процессе роста, выделять из них главные, дополнительные и декоративные (отделочные). Для обеспечения скорейшего вступления в работу посадки должны быть быстрорастущими.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кочуров Б. И., Ивашкина И. В.* Культурный городской ландшафт: геоэкологические и эстетические аспекты изучения и формирования // *Экология урбанизированных территорий.* 2010. № 4. С. 15—23.
2. *Кочуров Б. И., Ивашкина И. В.* Городские ландшафты Москвы: от традиционных до гармоничных и сбалансированных // *Экология урбанизированных территорий.* 2012. № 1. С. 6—11.
3. *Ивашкина И. В., Кочуров Б. И.* Формирование пространственной композиции культурного ландшафта города // *Экология урбанизированных территорий.* 2012. № 3. С. 22—28.
4. *Чернышенко О. В.* Поглотительная способность и газоустойчивость древесных растений в условиях города: дис... д-ра биол. наук. М., 2001. 193 с.
5. *Кулагин Ю. З.* Индустриальная дендрология и прогнозирование. М.: Наука, 1985. 120 с.
6. *Цыганков В. В.* Оценка акустических свойств зеленых насаждений в городской среде: дис... д-ра с.-х. наук. Брянск, 1996. 277 с.
7. Градостроительные меры борьбы с шумом / Г. Л. Осипов, Б. Г. Прутков, И. А. Шишкин, И. Л. Карагодина. М.: Стройиздат, 1975. 215 с.
8. *Сидоренко В. Ф., Кириллов Г. П., Фельдман Ю. Г.* Исследование газозащитной эффективности зеленых насаждений на автомагистралях // *Гигиена и санитария.* 1973. № 10. С. 6—8.
9. *Сидоренко В. Ф., Балакин В. В., Фельдман Ю. Г.* Выбор для автомагистралей конструкции полос зеленых насаждений по их газозащитным свойствам // *Гигиена и санитария.* 1978. № 4. С. 106—108.
10. *Балакин В. В.* Защита жилой застройки от выбросов автотранспорта // *Жилищное строительство.* 1984. № 6. С. 16—17.
11. *Балакин В. В.* Экологическое обоснование проектов планировки, застройки и благоустройства примагистральных территорий // *Проблемы строительного и дорожного комплексов:* тр. Междунар. науч.-технич. конф. Брянск, 1998. С. 144—148.
12. *Константинов А. Р.* Влияние лесных полос на ветер и турбулентный обмен в приземном слое воздуха. // *Вопросы гидрометеорологической эффективности полезащитного лесоразведения.* Л.: Гидрометеиздат, 1950. С. 44—56.

13. *Городков А. В.* Рекомендации по проектированию средозащитного озеленения территорий городов. СПб., 1998. 141 с.
14. *Балакин В. В.* Влияние ветрового режима на очищение воздуха магистральных улиц от выбросов автотранспорта // Гигиена и санитария. 1980. № 6. С. 5—7.
15. *Андреев П. И.* Рассеяние в воздухе газов, выбрасываемых промышленными предприятиями. М.: Госиздат, 1952. 81 с.
16. *Бояришинов М. Г.* Влияние лесного массива на перенос и рассеивание автотранспортных выбросов // Доклады Международного экологического конгресса «Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности». Санкт-Петербург, 14—16 июня, 2000. Т. 2. СПб.: БГТУ, 2000. С. 235—237.
17. *Балакин В. В.* Регулирование аэрационного режима уличных каньонов приемами планировки и застройки // Вестник МГСУ. 2014. № 5. С. 108—118.
18. *Подольский В. П., Канищев А. Н., Рудаев В. Н.* Определение ажурности в снегозадерживающих лесополосах // 5 международная науч.-технич. конф. «Решение экологических проблем в автотранспортном комплексе». Москва, 1—2 февраля 2001. Сб. докладов. М.: МАДИ (ГТУ), 2001.
19. *Venegas Laura E., Mazzeo Nicoias A.* Carbon monoxide concentration in a street canyon of Buenos Aires city (Argentina) // Environmental Monitoring and Assessment. 2000. Vol. 65. No. 1—2. Pp. 417—424.
20. An integrated approach to street canyon pollution modeling / Paul S. Addison, John I. Currie, David J. Low, Joanna M. McCann // Environmental Monitoring and Assessment. 2000. Vol. 65. No. 1—2. Pp. 333—342.
21. *Morten N.* Turbulent ventilation of a street canyon // Environmental Monitoring and Assessment. 2000. Vol. 65. No. 1—2. Pp. 389—396.
22. *Jong-Jin Baik, Jae-Jin Kim.* A Numerical Study of Flow and Pollutant Dispersion Characteristics in Urban Street Canyons // Journal of Applied Meteorology. 1999. Vol. 38. No. 11. Pp. 1576—1589.
23. Validation of a two-dimensional pollutant dispersion model in an isolated street canyon / T. L. Chan, G. Dong, C. W. Leung, C. S. Cheung, W. T. Hung // Atmospheric Environment. 2002. Vol. 36. No. 5. Pp. 861—872.
24. *Jicha M., Pospisil J., Kftolicky J.* Dispersion of pollutants in street canyon under traffic induced flow and turbulence // Environmental Monitoring and Assessment. 2000. Vol. 65. No. 1—2. Pp. 343—351.
25. Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons / Kiyoshi Uehara, Shuzo Murakami, Susumu Oikawa, Shinji Wakamatsu // Atmospheric Environment. 2000. Vol. 34. No. 10. Pp. 1553—1562.
26. *Kim Jae-Jin, Baik Jong-Jin.* A Numerical Study of Thermal Effects on Flow and Pollutant Dispersion in Urban Street Canyons // Journal of Applied Meteorology. 1999. Vol. 38. № 9. Pp. 1249—1261.
27. *Assimakopoulos V. D., ApSimon H. M., Moussiopoulos N.* A numerical study of atmospheric pollutant dispersion in different two-dimensional street canyon configurations // Atmospheric Environment. 2003. Vol. 37. № 29. Pp. 4037—4049.
28. *Бечина Д. Н.* Древесно-кустарниковая растительность в городских условиях и ее влияние на снижение шума от автотранспорта (на примере города Саратова): дис... канд. биол. наук. Саратов. Саратов. гос. аграр. ун-т, 2006. 17 с.
29. *Прохода А. С.* Инженерные методы расчета транспортного шума в застройке: дис... канд. техн. наук. М., 1983. 161 с.
30. *Буторина М. В.* Составление карты шума автомобильных дорог и ее использование для снижения шума в жилой застройке (на примере транспортного обхода вокруг Санкт-Петербурга): дис... канд. техн. наук. СПб., 2002. 202 с.
31. Применение зеленых насаждений для снижения шума в крупных городах // Проблемы больших городов / сост. М. М. Болховитина. М., 1979. Вып. 3. 28 с.
32. *Ивченко Т. В., Романова Р. А., Короткова Е. Ю.* Озеленение крупных населенных пунктов как компенсация загрязнения атмосферного воздуха автомобильным транспортом // Экология урбанизированных территорий. 2014. № 1. С. 30—33.

© Балакин В. В., 2015

Поступила в редакцию
в марте 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Балакин В. В. Принципы формирования объектов ландшафтно-средозащитного озеленения на городских дорогах и улицах // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 40(59). С. 58—72.

Об авторе:

Балакин Владимир Васильевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, balakin-its@yandex.ru

V. V. Balakin

PRINCIPLES OF ARRANGEMENT OF PLANTED SHELTERBELTS IN URBAN STREETS AND ROADS

The article approaches the problem of the noise and exhaust from motor vehicles as negative technogenic factors in urban environment. It contains the data of field observations and modeling experiments for dispersion of vehicle exhaust pollutants in variously structured planted shelterbelts in urban streets and roads. Combinations of plants and their arrangements in shelterbelts are suggested for maximizing of the dispersion of vehicle exhaust pollutants and noise muffling. Guidelines are provided for optimized protective use of planted shelterbelts to keep the discomfort factors down to the standards within residential areas.

Key words: motor vehicle exhaust, traffic noise, planted zone, absorption, dispersion, gas protective efficiency, noise muffling, shelterbelt width, combination of plants.

REFERENCES

1. Kochurov B. I., Ivashkina I. V. [Cultural urban landscape: geocological and aesthetic aspects of its examination and formation]. *Ekologiya urbanizirovannykh territorii* [Ecology of Urban Areas], 2010, no. 4, pp. 15—23.
2. Kochurov B. I., Ivashkina I. V. [Urban landscapes of Moscow: from traditional ones to harmonious and well-balanced views]. *Ekologiya urbanizirovannykh territorii* [Ecology of Urban Areas], 2012, no. 1, pp. 6—11.
3. Ivashkina I. V., Kochurov B. I. [Formation of spatial composition for cultural landscape of city]. *Ekologiya urbanizirovannykh territorii* [Ecology of Urban Areas], 2012, no. 3, pp. 22—28.
4. Chernyshenko O. V. *Poglotitel'naya sposobnost' i gazoustoichivost' drevesnykh rastenii v usloviyakh goroda: dis... d-ra biol. nauk* [Absorbing capacity and gas resistance of woody plants under the conditions of a city. Dis. Dr. Biol. Sci.]. Moscow, 2001. 193 p.
5. Kulagin Yu. Z. *Industrial'naya dendrologiya i prognozirovanie* [Industrial dendrology and forecasting]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 120 p.
6. Tsygankov V. V. *Otsenka akusticheskikh svoystv zelenykh nasazhdenii v gorodskoi srede: dis... d-ra s.-kh. nauk* [Assessment of acoustic properties of green plantings in urban environment. Diss. Dr. Agr. Sci.]. Bryansk, 1996. 277 p.
7. Osipov G. L., Prutkov B. G., Shishkin I. A., Karagodina I. L. *Gradostroitel'nye меры бор'бы s шумом* [Town-planning measures of noise control]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1975. 215 p.
8. Sidorenko V. F., Kirillov G. P., Fel'dman Yu. G. [Research of gas-protective efficiency of green plantings on highways]. *Gigiena i sanitariya* [Hygiene and sanitation], 1973, no. 10, pp. 6—8.
9. Sidorenko V. F., Balakin V. V., Fel'dman Yu. G. [Choice of design of green planting lanes in view of their gas-protective properties for highways]. *Gigiena i sanitariya* [Hygiene and sanitation], 1978, no. 4, pp. 106—108.
10. Balakin V. V. [Protection of residential development against vehicle emissions]. *Zhilyshchnoe stroitel'stvo* [Housing Construction], 1984, no. 6, pp. 16—17.
11. Balakin V. V. [Ecological feasibility of projects of planning, development and improvement of near magistral territories]. *Problemy stroitel'nogo i dorozhnogo kompleksov. : tr. Mezhdunar.*

nauch.-tekhnich. konf. [Problems of construction and road complexes. Pros. Int. Conf.]. Bryansk, 1998. Pp. 144—148.

12. Konstantinov A. R. [Influence of forest belts on wind and turbulent exchange in surface air]. *Voprosy gidrometeorologicheskoi effektivnosti polezashchitnogo lesorazvedeniya* [Issues of hydrometeorological efficiency of field-protecting forestry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1950. Pp. 44—56.

13. Gorodkov A. V. *Rekomendatsii po proektirovaniyu sredo-zashchitnogo ozeleneniya territorii gorodov* [Recommendations on design of environmental protection planting of city territories]. Saint-Petersburg, 1998. 141 p.

14. Balakin V. V. [Influence of wind pattern on purification of the air in through streets from vehicle emissions]. *Gigiena i sanitariya* [Hygiene and sanitation], 1980, no. 6, pp. 5—7.

15. Andreev P. I. *Rasseyaniye v vozdukh gazov, vybrasyvaemykh promyshlennymi predpriyatiyami* [Dispersal of gases produced by enterprises into the air]. Moscow, Gosizdat Publ., 1952. 81 p.

16. Boyarshinov M. G. [Influence of forest area on transfer and dispersal of vehicle emissions]. *Doklady Mezhdunarodnogo ekologicheskogo kongressa «Novoe v ekologii i bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti»*. Sankt-Peterburg, 14—16 iyunya, 2000. T. 2 [Reports of the International Ecological Congress “New in ecology and life safety”]. St. Petersburg, 14—16 June, 2000. Vol. 2]. Saint-Petersburg, BSTU Publ., 2000. Pp. 235—237.

17. Balakin V. V. [Street canyon ventilation control by proper planning and development]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering], 2014, no. 5, pp. 108—118.

18. Podolskii V. P., Kanishchev A. N., Rudaev V. N. [Determination of openness in snow-retaining forest belts]. *5 mezhdunarodnaya nauch.-tekhnich. konf. «Reshenie ekologicheskikh problem v avtotransportnom komplekse»*. Moskva, 1—2 fevralya 2001 [5th Int. Sci.-Tech. Conf. “Solution of environmental problems in motor transport complex”]. Moscow, 1—2 February, 2001]. Moscow, MADI (STU) Publ., 2001.

19. Venegas Laura E., Mazzeo Nicoias A. Carbon monoxide concentration in a street canyon of Buenos Aires city (Argentina). *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, 65(1—2), pp. 417—424.

20. Paul S. Addison, John I. Currie, David J. Low, Joanna M. McCann. An Integrated Approach to Street Canyon Pollution Modelling. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, 65(1—2), pp. 333—342.

21. Morten Nielsen. Turbulent ventilation of a street canyon. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, 65(1—2), pp. 389—396.

22. Jong-Jin Baik, Jae-Jin Kim. A Numerical Study of Flow and Pollutant Dispersion Characteristics in Urban Street Canyons. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 38(11), pp. 1576—1589.

23. Chan T. L., Dong G., Leung C. W., Cheung C. S., Hung W. T. Validation of a two-dimensional pollutant dispersion model in an isolated street canyon. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(5), pp. 861—872.

24. Jicha M., Pospisil J., Kftolicky J. Dispersion of pollutants in street canyon under traffic induced flow and turbulence. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, 65(1—2), pp. 343—351.

25. Uehara K., Murakami S., Oikawa S., Wakamatsu S. Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(10), pp. 1553—1562.

26. Jae-Jin Kim, Jong-Jin Baik. A Numerical Study of Thermal Effects on Flow and Pollutant Dispersion in Urban Street Canyons. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 38(9), pp. 1249—1261.

27. Assimakopoulos V. D., ApSimon H. M., Moussiopoulos N. A numerical study of atmospheric pollutant dispersion in different two-dimensional street canyon configurations. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(29), pp. 4037—4049.

28. Bechina D. N. *Drevesno-kustarnikovaya rastitel'nost' v gorodskikh usloviyakh i ee vliyanie na snizhenie shuma ot avtotransporta (na primere goroda Saratova): dis... kand. biol. nauk* [Trees and shrubs in city conditions and their influence on transport noise control (on the example of Saratov city). Dis. Cand. Biol. Sci.]. Saratov, Saratov St. Agr. Un. Publ., 2006, 17 p.

29. Prokhoda A. S. *Inzhenernye metody rascheta transportnogo shuma v zastroyke: dis... kand. tekhn. nauk* [Engineering methods of calculation of transport noise in development. Dis. Cand. Eng. Sci.]. Moscow, 1983. 161 p.

30. Butorina M. V. *Sostavlenie karty shuma avtomobil'nykh dorog i ee ispol'zovanie dlya snizheniya shuma v zhiloi zastroyke (na primere transportnogo obkhoda vokrug Sankt-Peterburga): dis...*

kand. tekhn. nauk [Drawing of map of noise on highways and its applying for noise control in housing development (on the example of pass by around St. Petersburg). Dis. Cand. Eng. Sci.]. Saint-Petersburg, 2002. 202 с.

31. [Applying of green plantings for noise control in big cities]. Bolkhovitina M. M. (ed.). *Problemy bol'shikh gorodov* [Problems of big cities]. Moscow, 1979. Iss. 3. 28 p.

32. Ivchenko T. V., Romanova R. A., Korotkova E. Yu. [Planting of greenery large settlements as compensation of air pollution by road]. *Ekologiya urbanizirovannykh territorii* [Ecology of Urban Areas], 2014, no. 1, pp. 30—33.

For citation:

Balakin V. V. [Principles of arrangement of planted shelterbelts in urban streets and roads]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 40(59), pp. 58—72.

About author:

Balakin Vladimir Vasil'evich — Candidate of Engineering Science, Docent, 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, balakin-its@yandex.ru

УДК 712.4:551.584.5

В. В. Прокопенко^а, О. А. Ганжа^б

^а *Волжский институт строительства и технологий (ВИСТех) — филиал ВолгГАСУ*

^б *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

К ВОПРОСУ О МЕТОДАХ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЯ КОМФОРТНОСТИ ЛАНДШАФТНО-РЕКРЕАЦИОННЫХ ТЕРРИТОРИЙ КРУПНЕЙШИХ ГОРОДОВ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА ВОЛГОГРАДА)

Разработана статистическая модель, которая отражает основные закономерности влияния антропогенных факторов на показатель комфортности ландшафтно-рекреационной территории.

К л ю ч е в ы е с л о в а: система озеленения города, ландшафтно-рекреационная территория.

Одной из первостепенных задач градостроительства XXI столетия является создание комфортной жизни в мегаполисах [1—3].

Ускоренные темпы развития постмодернистского пространства привели к затруднению обитания горожан в функциональных структурах города. Деятельность человека частично или полностью изменила открытые пространства, которые предназначены для отдыха населения и оздоровления окружающей среды, насытив их химическими и механическими отходами антропогенной деятельности. Хаотичная организация городского пространства и отсутствие «островков природы» в целом негативно влияют на эмоциональное состояние человека, что приводит к сокращению продолжительности жизни и трудового долголетия [4—7].

Одним из средств оздоровления урбанизированной территории должен быть шаг к анагенезу ландшафтно-рекреационных территорий и увеличению площади их озеленения.

Именно система рекреации выступает в качестве неотъемлемого элемента градостроительства, способного создать благоприятные санитарно-гигиенические условия на городских территориях. В целях проведения анализа состояния и оценки эффективности озелененных пространств в городской среде предлагается применить показатель комфортности ландшафтно-рекреационной территории крупнейшего города.

Анализ научных исследований, посвященных изучению системы озелененных территорий города (система озеленения), позволил сделать вывод, что основой системы является природный ландшафт. Это материальная система, изменяющаяся во времени и формирующаяся при взаимодействии двух групп факторов: природных и антропогенных (рис. 1) [8, 9].

Рассматривая систему озеленения и анализируя взаимодействие ее элементов, человек создает и управляет системой «Город», тем самым способствует развитию антропогенного изменения природного ландшафта. Одновременно система озеленения города является компонентом природного ландшафта, при условии рациональной организации оказывает существенное влияние на показатели качества окружающей среды. Таким образом, человек создает и управляет двумя противоречивыми системами: первая — система

антропогенного воздействия городской среды с группами факторов: транспортных, строительных, производственных и других, вторая — система озеленения города в виде оздоравливающей среды, являющаяся мощным средством улучшения воздухообмена и регенерирования территории. хозяйственная деятельность человека способствует развитию и изменению антропогенной системы. Озелененные территории, оздоравливающие городскую среду, остаются без изменений либо подвержены деградации вследствие влияния антропогенных факторов. Поэтому необходимо, чтобы системы были уравновешены, их взаимодействие не вызывало ухудшение состояния здоровья человека и снижение качества жизни.

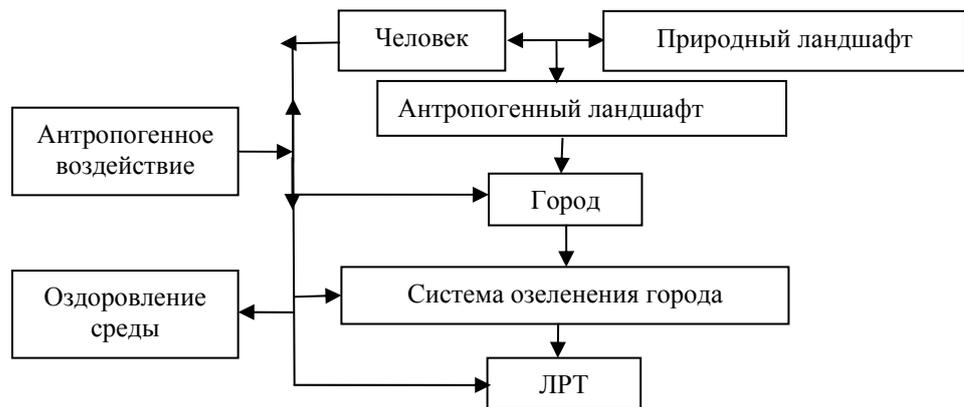


Рис. 1. Взаимодействие системы «Город» и системы озеленения

В целях проведения оценки взаимодействия двух систем необходимо проследить этапы формирования системы озеленения территории города. От размещения общегородских объектов озеленения, их назначения, планировки, функций и состояния насаждений зависит в целом уровень озеленения города. При организации системы озеленения необходимо учитывать взаимодействие человека с компонентами озеленения на всех стадиях культурно-бытового обслуживания. Рассматривая городскую агломерацию, это можно представить в виде графической модели (рис. 2) [10], которая отображает непрерывную систему озеленения города путем соединения каждого уровня обслуживания коммуникационными «зелеными коридорами».

Первым элементом озеленения должен быть жилой двор, далее микрорайонный сад, являющийся элементом повседневного обслуживания, после следует сад жилого района, городской парк и другие сегменты озеленения — элементы периодического обслуживания и т. д. до загородных парков, лесопарков, гидропарков, являющихся элементами озеленения эпизодического обслуживания. Такой подход к благоустройству территории позволяет организовать построение непрерывной системы озеленения города.

Выполненный анализ научных работ о ландшафтно-рекреационных территориях позволяет сделать вывод об отсутствии единых критериев в оценке показателя комфортности системы озеленения города. Допускаются разночтения в методиках исследования и формирования планировочной системы озеленения города на различных стадиях градостроительного проектирования.

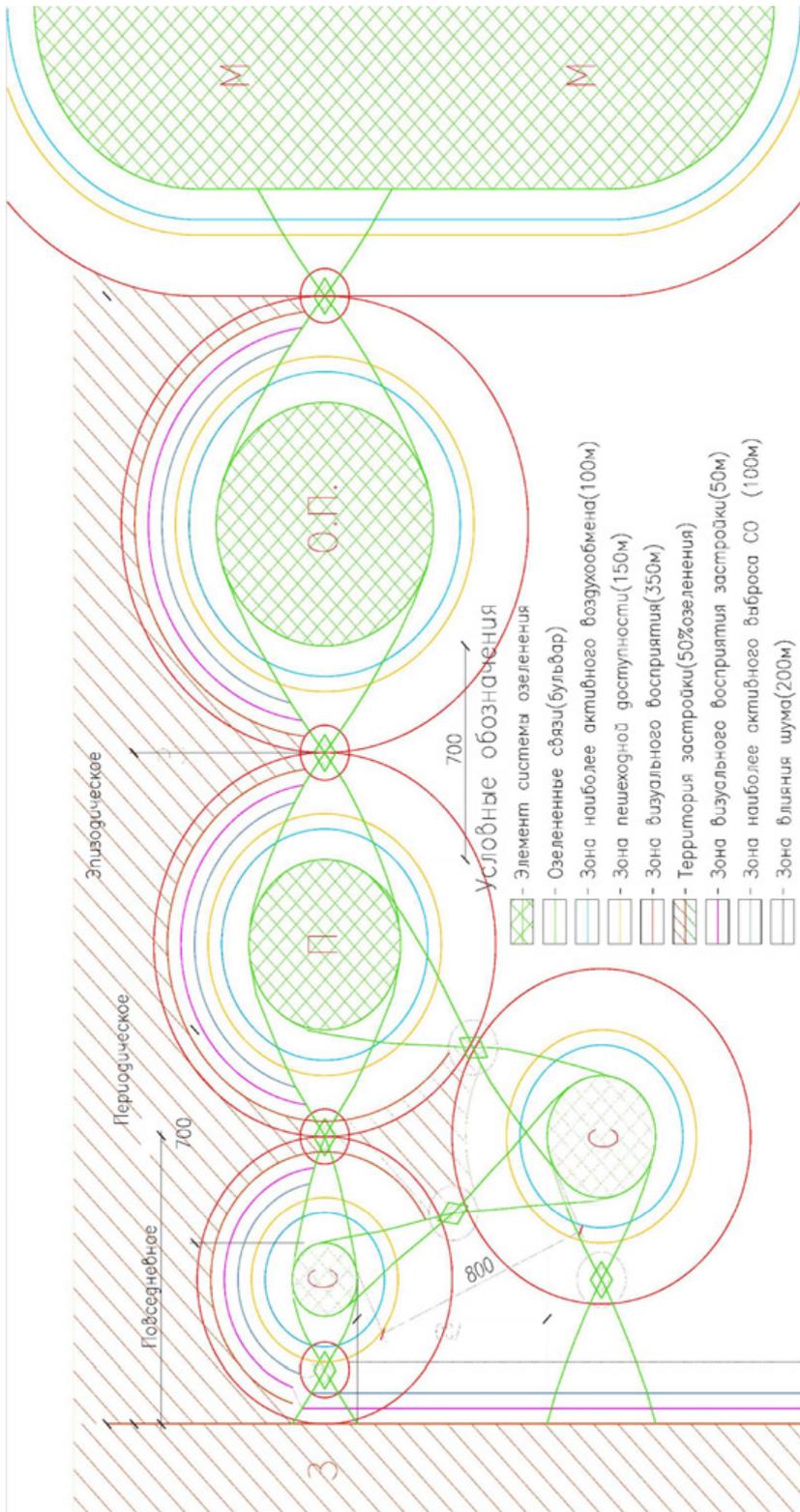


Рис. 2. Модель системы озеленения города

В целях совершенствования методов проведения оценки показателя комфортности ландшафтно-рекреационной территории предложены следующие методики.

Методика расчета выделения кислорода растительностью ЛРТ: построена на основе метода расчета процесса фотосинтеза, предложенного В. Н. Луканиным (рис. 3).



Рис. 3. Блок-схема алгоритма определения кислородного баланса

Гипотеза расчета построена на том, что объекты рекреации — это эффективные поставщики чистого воздуха в городскую среду. В результате проведения оценки определяется количество кислорода, выделяемое зелеными насаждениями ландшафтно-рекреационной территории, и достаточность его для жителей прилегающей территории.

Данную методику следует использовать на стадии генерального плана и проекта планировки с учетом климатической зоны территории и экологической обстановки и при расчете озелененности территории.

Методика расчета площади объекта ландшафтно-рекреационной территории и его влияния на систему «Город» [11], целью которой является выявление площади объекта рекреации, определение равномерности распределения объектов рекреации на территории районов исследования, разрывы между рекреационными территориями, определение границы влияния рекреационной территории на систему «Город» по трем зонам [12, 13]: определение баланса территории района по трем благотворным зонам; определение количества жителей района, проживающих в условиях благотворного влияния объектов рекреации, а также количество жителей, проживающих в отсутствии влияния рекреационной территории на прилегающую территорию.

Достижение целей возможно на основании проведения двух расчетов: геометрического с использованием математических алгоритмов и графоаналитического расчета. Исследование складывается из наложения на план административных районов сетки с Δ шагом 250 м, и на основе данных о площадях озелененных территорий систем рекреации оценивалась степень озеленения в каждом квадрате разбиения Δ .

Следующим этапом исследования является определение влияния ландшафтно-рекреационных территорий на систему «Город» с использованием графоаналитического метода. Радиус влияния рекреационных территорий R_r принят равным 1,5 км. Метод позволяет выявить влияние объектов рекреации по зонам:

зона 1 — зона воздухообмена, принята в размере 250 м от границы объекта;

зона 2 — зона визуального восприятия объектов рекреации — 500 м;

зона 3 — радиус доступности (обслуживания), принят равным нормативному значению и варьируется от 500 до 1500 м в зависимости от категории объекта.

В алгоритме построения клеточной функции показателя экологического состояния степени озеленения территории использованы разработки В. Н. Луканина (рис. 4) [13, 14].

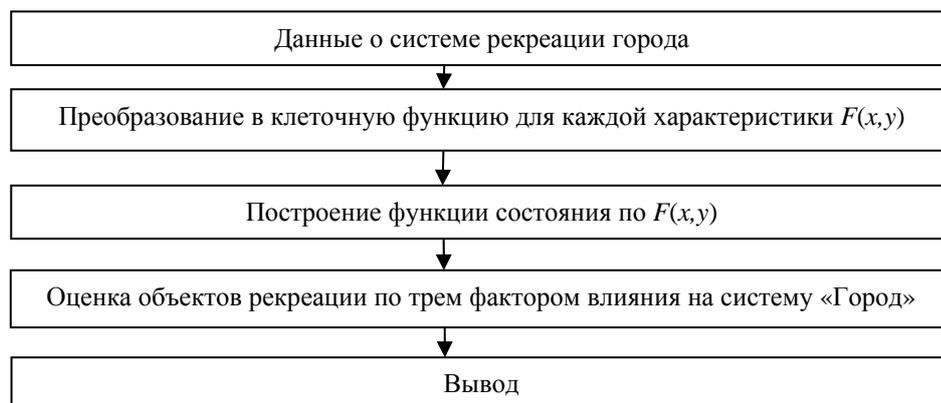


Рис. 4. Схема алгоритма построения клеточной функции

Метод априорного ранжирования факторов заключается в оценке факторов, которые, согласно априорной информации, имеют существенное влияние и ранжируются в порядке убывания вносимого ими вклада. Вклад каждого фактора оценивается по величине ранга — места, которое отведено экспертом в процессе проведения опроса данному фактору при ранжировании всех факторов с учетом предполагаемого (количественно неизвестного) влияния на параметры оптимизации. В процессе проведения опроса каждый эксперт заполняет анкету, в которой перечислены факторы, их размерность и предлагаемые интервалы варьирования. При заполнении анкеты эксперт определяет место факторов в ранжированном ряду. Обработка результатов опроса проводится по предлагаемому алгоритму (рис. 5).

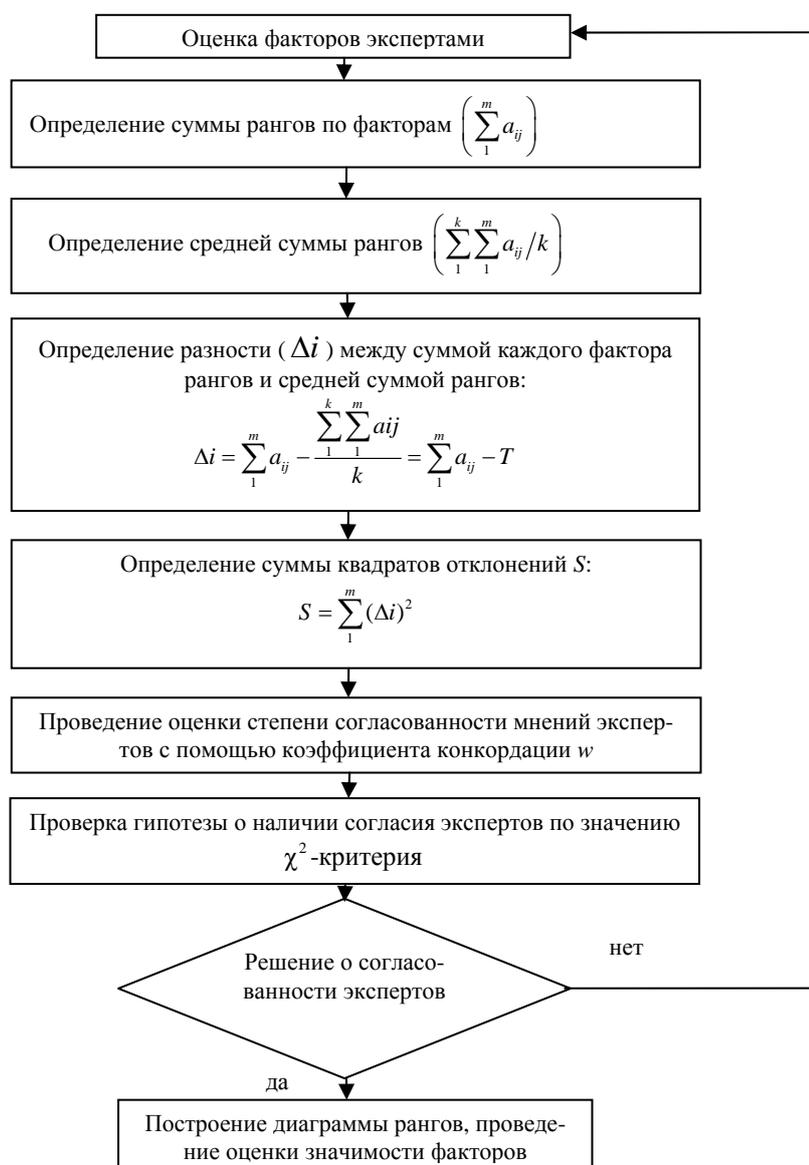


Рис. 5. Блок- схема алгоритма процедуры априорного ранжирования факторов

Методика оценки факторов, влияющих на формирование показателя комфортности ландшафтно-рекреационной территории [15]. На показатель комфортности ландшафтно-рекреационной территории оказывает влияние группа антропогенных факторов, большинство которых взаимосвязаны и взаимозависимы между собой. Для проведения предварительной оценки факторов применяется метод анализа иерархий (МАИ).

Метод построения статистической модели на основе регрессионного анализа. Для установления факта зависимости показателя комфортности ландшафтно-рекреационной территории от множества одновременно и совокупно действующих факторов применяется множественный корреляционный и регрессионный анализ.

Предварительно проведена классификация объектов ландшафтно-рекреационной территории по следующим признакам: градостроительному назначению; по профилю; категории и площади; функция.

Анализ системы озеленения города Волгограда показывает, что рекреационные территории по административным районам распределены довольно неравномерно и большинство жителей не находятся в зоне благотворного влияния зеленых насаждений. Результаты расчета влияния системы озеленения на застройку приведены в табл. 1 [13].

Таблица 1

Влияние ландшафтно-рекреационной территории на территорию районов Волгограда (баланс территории по трем зонам)

Рекреационная территория	Площадь территории в зоне влияния рекреационной территории		Количество людей в зоне влияния рекреационной территории	
	км ² /Sp-на в км ²	% от 100 % Sp-на	чел. от $N_{\text{жит.р-на}}$	% от 100 % $N_{\text{жит.р-на}}$
1	2	3	4	5
Центральный район				
1 зона	3,01/11,20	27	22300/85553	26
2 зона	5,41/11,20	48	44350/85553	51
3 зона	7,11/11,2	69	57650/85553	67
Краснооктябрьский район				
1 зона	4,39/34,20	13	25600/150659	17
2 зона	8,62/34,20	25	44000/150659	29
3 зона	11,45/34,20	33	54060/150659	36

Установлено, что 69 % территории Центрального административного района находится в зоне благотворного влияния ландшафтно-рекреационной территории, а в Краснооктябрьском административном районе — 33 % территории, при условии, что нормативный показатель составляет не менее 80...90 %.

Результаты, представленные в табл. 2, позволяют сравнить существующие данные по объектам, ландшафтно-рекреационным территориям и нормативным показателям. Согласно СП 42.13330.2011, площадь озеленения рай-

онных парков в крупнейших городах должна быть от 7 до 14 га, тогда как площади парков у ДК им. Ленина и Пионерского парка составляют 3,6 и 1 га соответственно. Для нормальных условий полноценного отдыха на одного посетителя парка требуется 50...60 м².

Методика оценки системы рекреации с применением клеточного анализа позволяет определить уровень озелененности территории и распределение объектов ландшафтно-рекреационной территории по административным районам города, а также выявить территории, которые находятся под влиянием системы рекреации.

Таблица 2

Расчетные параметры, характеризующие систему озеленения административных районов города Волгограда

Объект	N	S	S_g	S_g/N	S_r	S_g/S_r	Sl	Sl/S_r	S_g/Sl
Городской сад	85 553	1 362 000	45 000	0,52	11 200 000	0,4 %	1 362 000	0,121	3,31 %
Комсомольский сад			36 000	0,42		0,32 %			2,65 %
Парк 2-й очереди Набережной			220 000	2,57		1,96 %			16,18 %
Парк Победы			105 000	1,23		0,94 %			7,72 %
ЦПКиО			330 000	3,86		2,95 %			24,26 %
Мамаев Курган			606 000	7,08		5,41 %			45,88 %
Пионерский парк	151 698	470 000	10 000	0,06	34 200 000	0,03 %	470 000	0,014	2 %
Парк у ДК Ленина			36 000	0,24		0,1 %			8 %
Парк «Монолит»			154 000	1,02		0,45 %			30 %
Парк им. Гагарина			88 000	0,58		0,26 %			19 %
Парк на 2-й Продольной			170 000	1,12		0,5 %			36 %
Парк на Нижнем поселке ПО «Баррикады»			12000	0,08		0,04 %			3 %

Примечание: N — численность постоянного населения района, чел; S — площадь озеленения, м²; S_g — площадь учетных зеленых насаждений в расчете на одного жителя, м²; S_g/N — обеспеченность зелеными насаждениями, м²; S_g/S_r — озелененность района — отношение площади учетных насаждений к общей площади района; S_r — площадь административного района, м²; Sl — общая площадь всех ландшафтных пространств в пределах района, м²; Sl/S_r — коэффициент общей средостабилизирующей способности — отношение площади ландшафтов к общей площади района; S_g/Sl — степень зависимости ландшафтов района, %.

Следующий этап исследования — это определение наиболее значимых факторов и параметров, оказывающих влияние на показатель комфортности ландшафтно-рекреационной территории, а также проведение ранжирования объектов озеленения с использованием метода анализа иерархий.

Применение метода анализа иерархий (МАИ) позволяет провести декомпозицию и представление задачи в иерархической форме. На первом уровне определяется общая цель «оценка группы факторов влияния на показатель комфортности ЛРТ»; на втором уровне — группа антропогенных факторов, уточняющих цель, на третьем уровне — 12 объектов (ландшафтно-рекреационная территория), которые оцениваются по отношению к критериям второго уровня [9].

В модели создана полная динамическая иерархия, в которой каждый элемент заданного уровня функционирует как критерий для всех элементов нижестоящего уровня. Графическое представление иерархии приведено на рис. 6.



Рис. 6. Методика оценки факторов влияния на показатель комфортности ЛРТ

На следующем этапе устанавливаются приоритеты критериев группы факторов каждой из альтернатив по данным критериям с целью выявления самой важной из них.

Обработка векторов проведена авторами в среде Microsoft Excel. Это позволило окончательно ранжировать исследуемые ландшафтно-рекреационные территории. В табл. 3 представлен искомый интегральный показатель комфортности ландшафтно-рекреационной территории. Расчет позволяет оценить объекты ландшафтно-рекреационной территории с точки зрения их критериальной оценки и выявить группу факторов и параметров, в наибольшей степени оказывающих влияние на показатель комфортности.

Интегральный показатель влияния группы факторов на показатель комфортности ландшафтно-рекреационной территории

Объекты ландшафтно-рекреационной территории общего пользования	Оценка группы факторов, оказывающих влияние на показатель комфортности ландшафтно-рекреационной территории	
	Интегральные приоритеты	Ранг (рейтинг)
Лесопарк Мамаев Курган	0,564	1
ЦПКиО	0,544	2
Парк 2-й очереди Набережной	0,367	3
Парк Победы	0,191	4
Городской сад	0,148	5
Комсомольский сад	0,059	6
Среднее значение вектора интегральных приоритетов	0,312	—

Проведенная оценка группы факторов антропогенного воздействия показывает, что на объекты рекреации Лесопарк Мамаев курган, ЦПКиО, Парк Победы и Городской сад в наибольшей степени влияет группа факторов химического и физического воздействия и группа планировочных факторов.

Для проведения математического описания степени влияния группы антропогенных факторов на показатель комфортности ландшафтно-рекреационной территории Центрального и Краснооктябрьского районов Волгограда применялись методы корреляционного и регрессионного анализа. На основании полученных значений векторов приоритетов из каждой группы рассмотренных факторов выделены следующие параметры [16]:

- 1) из группы факторов химического и физического воздействия: выбросы СО и шумовое загрязнение;
- 2) из группы планировочных факторов: площадь территории и площадь озеленения.

С использованием метода многошагового регрессионного анализа проведен расчет значений коэффициента регрессии в среде Microsoft Excel. Полученное уравнение регрессии имеет следующий вид [9]:

$$K = 0,32 + 0,008x_1 - 0,0006x_2 - 0,088x_3, \quad (1)$$

где K — значение показателя комфортности ландшафтно-рекреационной территории; x_1 — шумовое загрязнение; x_2 — количество деревьев; x_3 — наличие защитной полосы.

Величина множественного коэффициента детерминации $R^2 = 0,787$. Проверка значимости уравнения регрессии: $\alpha_p = 0,0045 < 0,05$, что подтверждает значимость коэффициента детерминации R^2 . На этом шаге $t_{кр} = 2,0639$, в критическую область $(-\infty; 2,0639) \cup (2,0639; +\infty)$ попадают расчетные значения t -критерия всех переменных $x_1, x_2, x_3, |t_p| > |t_{табл}|$. Все коэффициенты данного уравнения регрессии значимы.

Уровень множественного коэффициента детерминации $R^2 = 0,787$ свидетельствует, что 78,7 % вариации результативного признака — показателя качества ландшафтно-рекреационной территории — объясняется вариацией

трех факторов: шумового загрязнения; количества деревьев; наличия защитной полосы.

Поскольку указанный уровень влияния достаточно высок, считаем, что все факторы, оказывающие существенное влияние на показатель комфортности, включены в модель. Уровень остаточной вариации составляет 21,3 %, что объясняется воздействием случайных факторов [17, 18].

В полученном уравнении регрессии математическая сущность коэффициентов указывает степень влияния каждого фактора на показатель комфортности ландшафтно-рекреационных территорий. О характере влияния каждого фактора показывают знаки коэффициентов.

При обобщении результатов проведенных исследований сформулирована теоретическая программа обоснования показателя комфортности ЛРТ и его влияния на размещение рекреационных территорий в планировочной структуре крупнейших городов. Алгоритм определения показателя комфортности осуществляется поэтапно (рис. 7, табл. 4).



Рис. 7. Блок-схема алгоритма определения показателя комфортности

На стадии проектирования генерального плана города необходимо провести равномерное распределение ландшафтно-рекреационных территорий в системе озеленения города с учетом озелененности территории, с учетом зонирования проектируемой территории, стремиться к обеспечению непрерывного озеленения на всех стадиях культурно-бытового обслуживания. В целях определения показателя комфортности ландшафтно-рекреационной территории согласно формуле (1) необходимо установить уровень оценки рекреации, используя данные табл. 4 и 5. Учитывая показатель комфортности и его уровень и зная прогнозируемую нагрузку на территорию, следует распределять объекты ландшафтно-рекреационной территории так, чтобы показатель комфортности не превышал 0,50.

Таблица 4

Описание методики и процесса определения значений и уровня показателя комфортности ландшафтно-рекреационных территорий (ЛРТ) на различных стадиях проектирования

Достижение цели исследования	Результат
I. Следуя методике расчета площади объекта и его влияния на систему «Город»	
1. Выявить три зоны влияния ЛРТ на сегменты города: - зона воздухообмена; - радиус доступности; - визуальное восприятие территории ЛРТ	Тематические карты
2. Выявить три зоны влияния города на ЛРТ: - шумовое воздействие; - визуальное влияние застройки; - зона активного влияния СО	Тематические карты
3. Разработать расчетно-графические материалы по моделированию и натурному исследованию территорий районов города путем наложения сетки квадратов для определения дисбаланса озеленения на селитебной территории	Тематические карты
4. Сформулировать принцип обоснования функционального зонирования территории селитьбы с вкраплением рекреационной территории на всех стадиях проектирования с учетом КБО населения	Тематические карты
II. Следуя методике расчета выделения кислорода растительностью ЛРТ	
Определить вклад ЛРТ в атмосферный баланс города	Графики распределения кислорода по территории города
III. Анализ антропогенных факторов при взаимосвязи системы «Город» и системы озеленения	Определены корреляционные связи между показателем комфортности ЛРТ и сегментами системы «Город»
IV. Установить уровень показателя комфортности ЛРТ в пределах 0...1.	

На стадии проекта планировки в разделе «Планировочный» и объекты ландшафтно-рекреационных территорий необходимо размещать с учетом данных табл. 4 и 5 в целях достижения комфортности среды, которая определяется ее качеством. В разделе «Архитектура и инженерно-техническое благоустройство» при разработке архитектурной концепции уделять особое внимание устройству защитной полосы объекта ландшафтно-рекреационной территории с учетом уровня показателя комфортности. При выборе дендрологического ассортимента в целях снижения уровня шумового загрязнения при организации защитной полосы необходимо подобрать эффективную конструкцию зеленых насаждений.

Таблица 5

Определение уровня показателя комфортности ландшафтно-рекреационных территорий (ЛРТ)

Значение показателя комфортности ЛРТ	Уровень показателя комфортности	Рекомендации по использованию территории
0...0,25	Весьма благоприятный	Рекомендовано без ограничений
0,26...0,50	Благоприятный	Рекомендуется использовать с внесением незначительных изменений в планировочную структуру объекта
0,51...0,75	Относительно благоприятный	Ограниченно рекомендуется использовать без реализации проекта по улучшению защитной полосы
0,76...1,0	Неблагоприятный	Не рекомендуется использовать без реализации комплекса планировочных изменений и комплекса защитных мероприятий от воздействия антропогенной нагрузки

Результатом проведенных исследований является определение ареала селитебной территории, благоприятной для проживания человека по трем показателям: зона воздухообмена, радиус доступности, визуальное восприятие объектов ландшафтно-рекреационной территории.

С использованием аналитического метода (МАИ) построена структурная модель, позволяющая принять альтернативные решения в процессе проведения предварительного отбора факторов и параметров, влияющих на показатель комфортности ландшафтно-рекреационной территории. Разработана статистическая модель, позволяющая установить зависимость показателя комфортности от группы антропогенных факторов, и установлена необходимость учета показателя комфортности в процессе разработки и принятия проектных решений по реновации и реконструкции функциональных зон города в целях развития и перспективного использования городской территории.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прокопенко В. В., Косицына Э. С. Эколого-гигиенический каркас рекреационных территорий // Научный потенциал молодых ученых для инновационного развития строительного комплекса Нижнего Поволжья: материалы Междунар. науч.-практич. конф., 24 декабря 2010 г., Волгоград: [в 2 ч.]. Волгоград: ВолГАСУ, 2011. Ч. II. С. 169—171.

2. *Fuchs C.* Neues aus Parish — Bercy // *Garten +Landschaft*. 1999. № 12. S. 18—21.
3. *Hager G.* Groser Garten Hannover — Hcrrenhauscn // *Garten +Landschaft*. 1998. № 7. S. 10—13.
4. *Arnold F.* Parc de Bercy in Paris // *TOPOS, European Landscape Magazine*. 1998. № 22. Pp. 87—93.
5. *Arnold F.* Frankreich: Zur Stadt beimgarten = France: doing something for cities // *TOPOS, European Landscape Magazine*. 1999. № 27. Pp. 6—15.
6. *Grandell G.* Zwei Plazas von Martha Schwartz // *Garten +Landschaft*. 1999. № 5. S. 9—13.
7. *Eckert R., Kuczma N.* Der Georgengarten // *Garten +Landschaft*. 2001. № 11. S. 28—30.
8. *Прокопенко В. В., Косицына Э. С.* Система компонентов городского ландшафта // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2012. Вып. 28(47). С. 301—303.
9. *Прокопенко В. В., Ганжа О. А.* Разработка статистической модели оценки показателя качества ландшафтно-рекреационной территории на примере города Волгограда // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2014. Вып. 35(54). С. 199—202.
10. *Прокопенко В. В., Костюченко И. В.* Коммуникационные связи большого города (на примере города Камышина) // XII региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области, Волгоград, 6—9 ноября 2012 г. : тез. докл. Волгоград: ВолГАСУ, 2013. С. 25—26.
11. *Прокопенко В. В., Косицына Э. С.* Методика определения равномерности объектов озеленения по районам города // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2013. Вып. 30(49). С. 284—287.
12. *Прокопенко В. В.* Оценка индекса качества ландшафтно-рекреационной территории Волгограда // Состояние, проблемы и перспективы развития социально ориентированного строительного комплекса на региональном уровне: материалы II Рос. науч.-техн. Интернет-конф., посвящ. 10-летию Себряковского филиала ВолГАСУ и 60-летию ВолГАСУ, 12 марта 2012 г., г. Михайловка. Волгоград: ВолГАСУ, 2012. С. 98—101.
13. *Прокопенко В. В.* Методика определения равномерности объектов озеленения по районам города // XII региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области, Волгоград, 6—9 нояб. 2012 г. : тез. докл. Волгоград: ВолГАСУ, 2013. С. 36—37.
14. *Луканин В. Н., Буслаев А. П., Яшина М. В.* Автотранспортные потоки и окружающая среда. М.: Инфра-М, 2001. 646 с.
15. *Прокопенко В. В., Косицына Э. С.* Методика субъективной оценки расчета качества ландшафтно-рекреационной территории // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Серия строительство и архитектура. 2013. Вып. 32(51). С. 253—256.
16. *Саати Т. Л.* Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / пер. с англ. 2-е изд. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 360 с.
17. *Ганжа О.А.* О применении метода анализа иерархий (МАИ) в оценке факторов, влияющих на уровень шума в зоне перекрестка // Шестая Международная науч.-практич. конф. (1—4 апреля 2008 г.) «Проблемы и перспективы развития жилищно-коммунального комплекса города». М.: Моск. ин-т коммун. хоз. и стр-ва, 2008. С. 45—49.
18. *Ганжа О. А., Соловьева Т. В.* Разработка статистической модели, устанавливающей зависимость эквивалентного уровня звука в зоне регулируемого перекрестка от планировочных и транспортных факторов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2008. Вып. 11(30). С. 158—162.

© Прокопенко В. В., Ганжа О. А., 2015

Поступила в редакцию
в феврале 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Прокопенко В. В., Ганжа О. А. К вопросу о методах оценки показателя комфортности ландшафтно-рекреационных территорий крупнейших городов (на примере города Волгограда) // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 40(59). С. 73—88.

Об авторах:

Прокопенко Вячеслав Валентинович — старший преподаватель, Волжский институт строительства и технологий (ВИСТех) — филиал ВолгГАСУ. Российская Федерация, 404111, г. Волжский, пр. Ленина, 72

Ганжа Ольга Александровна — канд. техн. наук, доцент кафедры экологического строительства и городского хозяйства, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, ganzha_olga@mail.ru

V. V. Prokopenko, O. A. Ganzha

TO THE ISSUE OF ASSESSMENT METHODS OF COMFORT OF LANDSCAPE AND RECREATION TERRITORIES IN LARGE TERRITORIES (BY THE EXAMPLE OF VOLGOGRAD)

The authors develop a statistical model, which reflects the main regularities of the influence of anthropogenic factors on the quality of landscape and recreation territory.

Key words: system of urban greening, landscape and recreation territory.

REFERENCES

1. Prokopenko V. V., Kositsyna E. S. [Environmental and health framework of recreational territories]. *Nauchnyi potentsial molodykh uchenykh dlya innovatsionnogo razvitiya stroitel'nogo kompleksa Nizhnego Povolzh'ya: materialy Mezhdunar. nauch.-praktich. konf., 24 dekabrya 2010 g., Volgograd: v 2 ch.* [Scientific potential of young scientists for innovative development of construction complex in Lower Volga region. Proc. Int. Conf., 24 December, 2014, Volgograd. In 2 pt.]. Volgograd, VSUACE Publ., 2011. Pt. II. Pp. 169—171.
2. Fuchs C. Neues aus Parish — Bercy. *Garten +Landschaft*, 1999, no. 12, s. 18—21.
3. Hager G. Groser Garten Hannover — Herrenhauscn. *Garten +Landschaft*, 1998, no. 7, s. 10—13.
4. Arnold F. Pare de Bercy in Paris. *TOPOS, European Landscape Magazine*, 1998, no. 22, pp. 87—93.
5. Arnold F. Frankreich: Zur Stadt beimgarten = France: doing something for cities. *TOPOS, European Landscape Magazine*, 1999, no. 27, pp. 6—15.
6. Grandell G. Zwei Plazas von Martha Schwartz. *Garten +Landschaft*, 1999, no. 5, s. 9—13.
7. Eckert R., Kuczma N. Der Georgengarten. *Garten +Landschaft*, 2001, no. 11, s. 28—30.
8. Prokopenko V. V., Kositsyna E. S. [System of component city landscape]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2012, iss. 28(47), pp. 301—303.
9. Prokopenko V. V., Ganzha O. A. [Development of strategic assessment model for quality level of landscape and recreation territory by the example of Volgograd oblast]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2014, iss. 35(54), pp. 199—202.
10. Prokopenko V. V., Kostyuchenko I. V. [Communication relations of a big city (on the example of the city of Kamyshin)]. *XII regional'naya konferentsiya molodykh issledovatelei Volgogradskoi oblasti, Volgograd, 6—9 noyabrya 2012 g. : tez. dokl.* [XII Regional Conference of Young Researchers of Volgograd Oblast, Volgograd, 6—9 November, 2012]. Volgograd, VSUACE publ., 2013. Pp. 25—26.
11. Prokopenko V. V., Kositsyna E. S. [The methods of determination of equitability of objects of gardening in city districts]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2013, iss. 30(49), pp. 284—287.
12. Prokopenko V. V. [Assessment of quality index of landscape and recreational territory in Volgograd]. *Sostoyaniye, problemy i perspektivy razvitiya sotsial'no orientirovannogo stroitel'nogo kompleksa na regional'nom urovne: materialy II Ros. nauch.-tekhn. Internet-konf., posvyashch. 10-*

letiyu Sebryakovskogo filiala VolgGASU i 60-letiyu VolgGASU, 12 marta 2012 g., g Mikhailovka [State, problems and development prospects of socially oriented construction complex on the regional level. Proc. II Russian Sci. and Tech. Internet-Conf., 12 March, 2012, Mikhailovka]. Volgograd, VSUACE Publ., 2012. Pp. 98 — 101.

13. Prokopenko V. V. [The methods of determination of equitability of objects of gardening in city districts]. *XII regional'naya konferentsiya molodykh issledovatelei Volgogradskoi oblasti, Volgograd, 6—9 noyabrya 2012 g. : tez. dokl.* [XII Regional Conference of Young Researchers of Volgograd Oblast, Volgograd, 6—9 November, 2012]. Volgograd, VSUACE publ., 2013. Pp. 36—37.

14. Lukanin V. N., Buslaev A. P., Yashina M. V. *Avtotransportnye potoki i okruzhayushchaya sreda* [Motor transport flows and environment]. Moscow, Infra-M Publ., 2001. 646 p.

15. Prokopenko V. V., Kositsyna E. S. [Procedure of subjective assessment of calculation of landscape and recreational territory quality]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2013, 32(51), pp. 253—256.

16. Saaty T. L. *Prinyatie reshenii pri zavisimostyakh i obratnykh svyazyakh: Analiticheskie seti* [Decision making with dependence and feedback: The Analytic Network Process]. 2nd ed. Moscow, Librokom Publ., 2009, 360 p.

17. Ganzha O. A. [Application of hierarchy analysis method (HAM) in the assessment of factors influencing noise level in road crossing zone]. *Shestaya Mezhdunarodnaya nauch.-praktich. konf. (1—4 aprelya 2008 g.) «Problemy i perspektivy razvitiya zhilishchno-kommunal'nogo kompleksa goroda»* [Sixth Int. Sc.-Pr. Conf. (1—4 April, 2008) “Problems and development prospects of housing and utilities complex of a city”]. Moscow, Mosc. Inst. of Ut. and Const., 2008. Pp. 45—49.

18. Ganzha O. A., Solov'eva T. V. [Development of the statistical model setting dependence of equivalent sound level in the zone of a signal-controlled junction on planning and traffic factors]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2008, iss. 11(30), pp. 158—162.

For citation:

Prokopenko V. V., Ganzha O. A. [To the issue of assessment methods of comfort of landscape and recreation territories in large territories (by the example of Volgograd)]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 40(59), pp. 73—88.

About authors:

Prokopenko Vyacheslav Valentinovich — Senior Lecturer, Volzhskii Institute of Civil Engineering and Technology (VISTech) — Affiliate Institute of VSUACE. 72, Lenin Avenue, Volzhskii, 404111, Russian Federation

Ganzha Ol'ga Aleksandrovna — Candidate of Engineering Science, Docent of Ecological Building and Municipal Facilities Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, ganzha_olga@mail.ru

УДК 624.131

А. Н. Богомолов^{а, б}, Д. В. Павлов^а, О. А. Богомолова^а, Л. А. Анисимов^а

^а *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

^б *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ НЕЗАКРЕПЛЕННОЙ ПОДЗЕМНОЙ ВЫРАБОТКИ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ, РАСПОЛОЖЕННОЙ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ЗАГЛУБЛЕННОГО ЛЕНТОЧНОГО ФУНДАМЕНТА

Рассматривается вопрос об определении безопасных параметров подземной выработки круглого поперечного сечения, расположенной в активной зоне заглубленного ленточного фундамента. При проведении исследования принято, что грунт основания наделен свойствами линейно-деформируемой среды, подчиняющейся условию прочности Кулона. Идея численного исследования заключается в том, что отыскиваются минимальные значения угла внутреннего трения грунта основания, которые гарантируют отсутствие на контуре выработки точек, в которых выполняется выбранное условие прочности при заданном сочетании численных значений переменных расчетных параметров. Согласно предложенному авторами критерию выработка в этом случае будет устойчива. В результате проведенных исследований построены графические зависимости, при помощи которых можно определить искомые значения угла внутреннего трения при условии, что численные значения переменных расчетных параметров изменяются в пределах, оговоренных в публикации.

Ключевые слова: подработанное основание ленточного фундамента, подземная выработка круглого сечения, напряженное состояние грунтового массива, условие прочности, области пластических деформаций, устойчивость выработки, безопасное расстояние.

Активное развитие строительства подземных сооружений и разветвленной сети подземных коммуникаций делает актуальной задачу расчета устойчивости подземной выработки, расположенной в активной зоне заглубленного ленточного фундамента. Результаты расчета незакрепленной выработки могут служить предварительным ориентиром при проектировании подземных сооружений.

Из литературы известно [1], что особенно часто используются выработки круглого сечения различных диаметров, примеры которых приведены на рис. 1. Поэтому именно такая форма выработки рассматривается в настоящей статье.

При проведении исследований считаем, что вмещающий массив деформируется как упругое тело, подчиняющееся условию прочности Кулона [2]:

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

где σ_x , σ_z , τ_{xz} — безразмерные (в долях γh) главные нормальные напряжения и компоненты напряжения в рассматриваемой точке; $\sigma_{св} = C(\gamma h \operatorname{tg} \varphi)^{-1}$ — приведенное давление связности; C , φ , γ и h — соответственно удельное сцепление, угол внутреннего трения, объемный вес грунта и определяющий размер рассматриваемого объекта (например, глубина заложения фундамента, выработки, ее размер и т. д.).

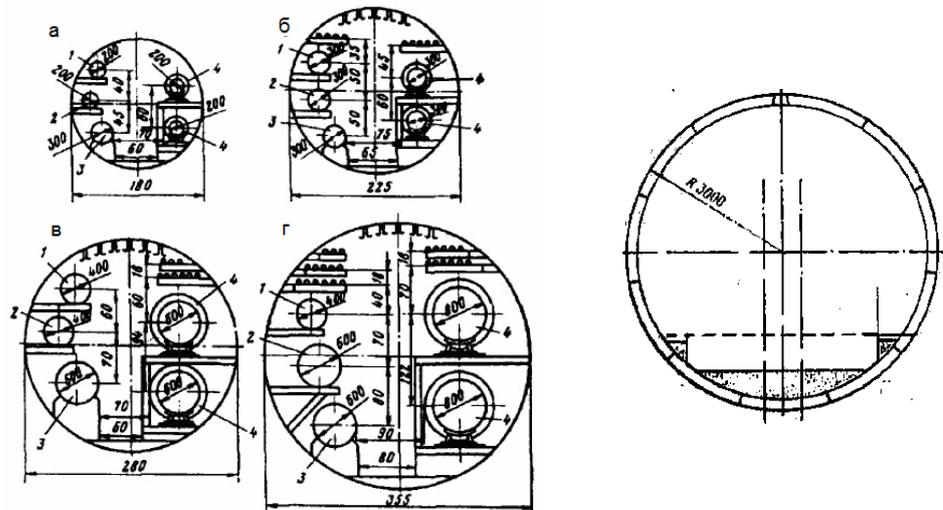


Рис. 1. Проходные коллекторные тоннели (слева) диаметром 1,8 м (а); 2,25 м (б); 2,8 м (в); 3,35 м (г): 1 — газопровод; 2 — трубопровод водоснабжения; 3 — напорный трубопровод канализации; 4 — трубопровод теплофикации) и перегонный тоннель метрополитена (справа) (цит. по [1])

Расчетные схемы метода конечных элементов, который в настоящее время является базальтернативным при анализе напряженно-деформированного состояния неоднородных, в том числе подработанных оснований фундаментов, составлены на основе результатов анализа данных о размерах фундаментов, приведенных в [3—4], а также в ГОСТ 1358-85 «Плиты железобетонные ленточных фундаментов. Технические условия».

Численные исследования устойчивости незакрепленной круглой выработки проведены при помощи компьютерной программы «Устойчивость. Напряженное состояние» [5], которая разработана в Волгоградском государственном архитектурно-строительном университете.

При проведении исследований принято, что геометрические параметры расчетной схемы и ее элементов, выраженные в долях глубины заложения фундамента d , принятой в качестве условной единицы, принимают следующие значения:

$d = 2$ м — глубина заложения фундамента — условная единица (определяется согласно СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений», и для Волгоградской области $d = 2$ м);

$b = 4$ м = $2d$ — ширина подошвы ленточного фундамента;

$h_f = 0,6$ м = $0,3d$ — высота ленточного фундамента;

$a = 1,8; 2,8; 6$ м = $0,9d; 1,4d; 3d$ — диаметр подземной выработки;

H_3 — глубина заложения подземной выработки ($H_3 = d + R \cos \theta$);

$R = 8; 10; 12; 14$ м = $4d; 5d; 6d; 7d$ — радиус-вектор, определяющий положение подземной выработки относительно фундамента;

$\theta = 0^\circ; 30^\circ; 60^\circ; 90^\circ$ — угол, определяющий положение радиуса-вектора относительно оси симметрии расчетной схемы (рис. 2).

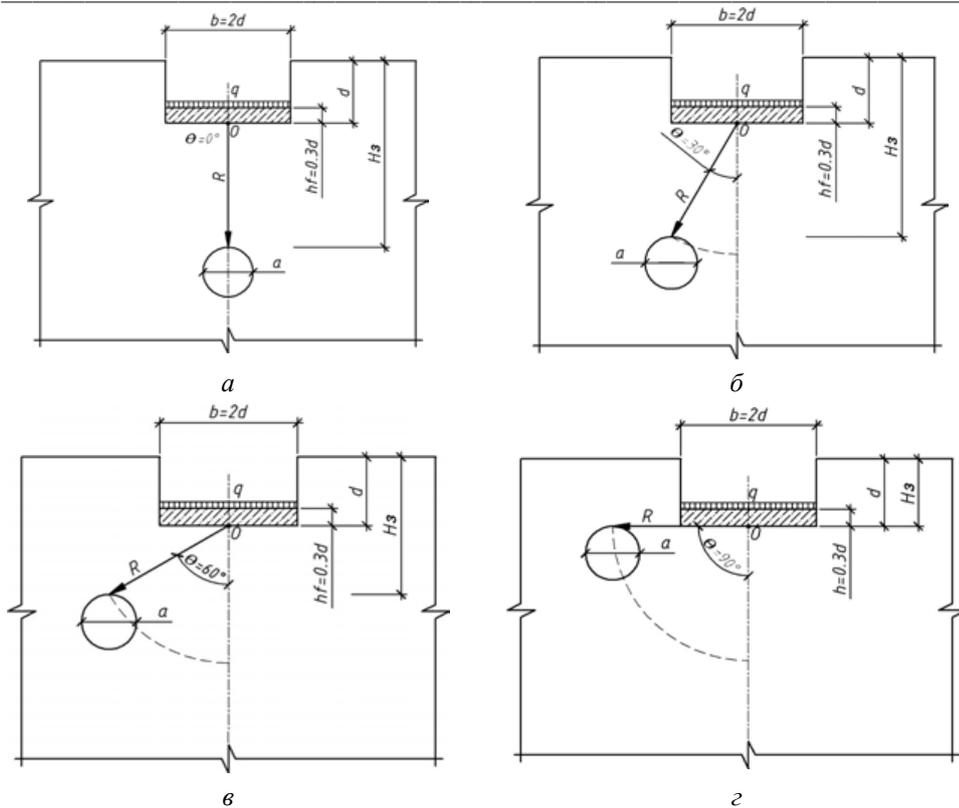


Рис. 2. Фрагменты расчетных схем при различном положении выработки относительно ленточного фундамента

Анализ формулы (1) говорит о том, что для ее использования надо знать численные значения напряжений, возникающих в точках расчетной области, физико-механические свойства грунта и материала фундамента, который не считаем гибким (учитываем при расчетах величину отношения модулей деформации грунта и материала фундамента).

В качестве вмещающей породы выберем глинистый грунт, экстремальные значения основных физико-механических характеристик которого определены согласно СП 22.13330.2011 и представлены в табл. 1.

Таблица 1

Экстремальные значения физико-механических характеристик вмещающего грунта

№ п/п	Наименование показателя	Единица измерения	Значение
1	γ — удельный вес грунта	т/м ³	2,0
2	C_{\min} — удельное сцепление грунта (минимальное)	т/м ³	0,9
3	C_{\max} — удельное сцепление грунта (максимальное)	т/м ³	8,1
4	φ_{\min} — угол внутреннего трения грунта (минимальный)	град.	7
5	φ_{\max} — угол внутреннего трения грунта (максимальный)	град.	37
6	ξ_0 — коэффициент бокового давления грунта	—	0,75
7	E_0 — модуль общей деформации грунта	МПа	31

Используя данные, приведенные в табл. 1, и комментарии к формуле (1), вычислим минимальное и максимальное значения величины приведенного давления связности, соответствующие вмещающему грунту: $\sigma_{св, \min} = 0,5$ и $\sigma_{св, \max} = 16,5$.

Все расчеты выполнены при четырех значениях величины $\sigma_{св} = 4; 6; 10; 16,5$.

Отметим, что величина $\sigma_{св} = 4$ выбрана не случайно, так как именно при этом начальном значении для выбранных размеров контуров подземных выработок, при заданной нагрузке, других прочих равных условиях на контурах выработок отсутствуют точки, «перешедшие» в предельное состояние, т. е. точки, где выполняется условие (1). Расчетами установлено, что при меньших значениях величины $\sigma_{св}$ области пластических деформаций будут образовываться на контуре выработок при тех же условиях даже при величине интенсивности внешней нагрузки $q = 0$.

Считаем, что фундамент выполнен из тяжелого бетона класса В25, основные физико-механические характеристики которого указаны в табл. 2 согласно СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции.

Т а б л и ц а 2

Физико-механические характеристики бетона

№ п/п	Наименование показателя	Единица измерения	Значение
1	Класс бетона	—	В25
2	γ — удельный вес бетона	т/м ³	2,35
3	ξ — коэффициент бокового давления	—	0,25
4	E_b — модуль деформации бетона	МПа	$30 \cdot 10^3$
5	σ_p — предел прочности на растяжение	МПа	1,05
6	σ_c — предел прочности на сжатие	МПа	14,5

Известно, что численные значения величин, эквивалентных удельному сцеплению и углу внутреннего трения для горных пород (бетон по своим физико-механическим свойствам может быть отнесен к искусственным горным породам), можно вычислить по формулам [6]

$$C = 0,5(\sigma_p \sigma_c)^{0,5}, \quad (2)$$

$$\varphi = \arcsin \left(\frac{\sigma_c - \sigma_p}{\sigma_p + \sigma_c} \right), \quad (3)$$

где σ_p и σ_c — пределы прочности материала фундамента при растяжении и сжатии.

Используя данные, приведенные в табл. 2, и формулы (2) и (3), получили $C = 1,95$ МПа и $\varphi = 60^\circ$. Тогда $\sigma_{св, б} = 28,15$.

При проведении вычислений будем считать, что величина равномерно распределенной нагрузки, передаваемой фундаментом на основание, постоянна, равна $5\gamma d$. Согласно [7] такая величина ее интенсивности соответствует среднему значению нагрузки, передаваемой от вышестоящего здания или сооружения на обрез ленточного фундамента.

На рис. 3 изображена расчетная конечно-элементная схема при условии, что $\theta = 0$, и приведены ее основные характеристики.

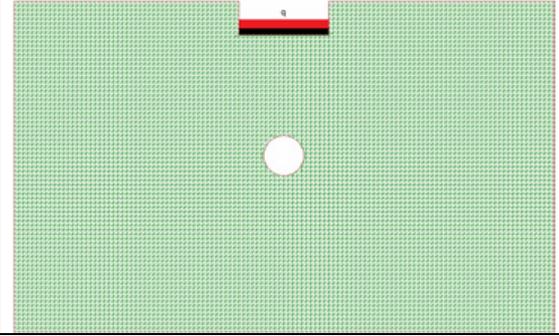
	№ п/п	Наименование параметра	Показатель
	1	Количество элементов	17 205
	2	Количество узлов	8870
3	Ширина матрицы жесткости системы	352	

Рис. 3. Расчетная конечно-элементная схема при $\theta = 0$ и ее основные характеристики

Триангуляция расчетной схемы выполнена таким образом, что она состоит из одинаковых треугольных элементов, за исключением тех, что непосредственно примыкают к контуру выработки и подошве фундамента.

Целью проведения расчетов является установление для всех возможных и имеющих физический смысл сочетаний численных значений переменных расчетных параметров таких значений угла внутреннего трения вмещающего грунта основания, при которых на контуре выработки отсутствуют точки, где выполняется условие (1). Или, другими словами, отыскание таких минимальных значений угла φ , при которых выработка при данном сочетании численных значений переменных расчетных параметров будет устойчива [8—10].

Вычисления проведены в следующей последовательности. Сначала задавалось некоторое значение угла φ , при котором на контуре выработки при заданном сочетании численных значений переменных расчетных параметров заведомо образуются пластические области, которые четко различимы на мониторе компьютера. Затем, постепенно увеличивая расчетное значение угла φ , добиваемся того, что пластические области на контуре выработки исчезают. Подбранное таким образом значение φ и является искомой величиной.

Подобные вычисления выполнены для всех возможных сочетаний численных значений переменных расчетных параметров, оговоренных выше. В результате построены графические зависимости вида $\varphi = f(R)$, часть которых (только для $a = 1,8$ м) приведена на рис. 4.

В результате анализа этих кривых установлено, что все они могут быть аппроксимированы степенной функцией, причем погрешность аппроксимации не превысит 4 %:

$$\varphi = aR^b, \quad (4)$$

где a и b — коэффициенты, причем коэффициент b — безразмерный, а коэффициент a имеет размерность [град./м].

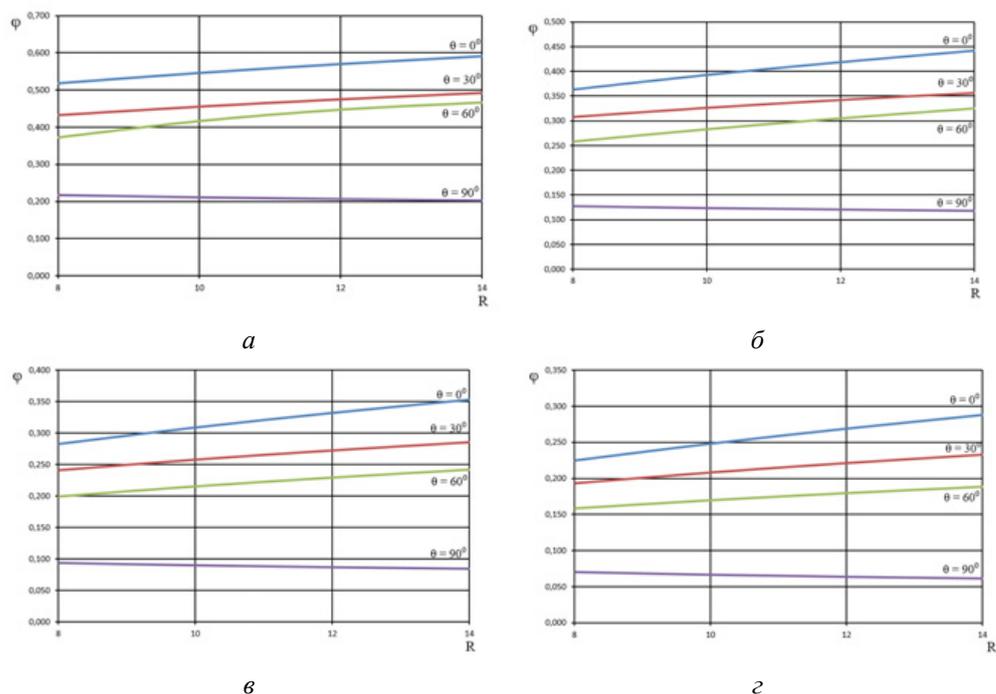


Рис. 4. Графические зависимости вида $\varphi = f(R)$ при $a = 1,8$ м и $\sigma_{св} = 4$ (а); $\sigma_{св} = 6$ (б); $\sigma_{св} = 10$ (в); $\sigma_{св} = 16,5$ (г)

На рис. 5 приведены графики для определения численных значений этих коэффициентов при $a = 1,8$ м.

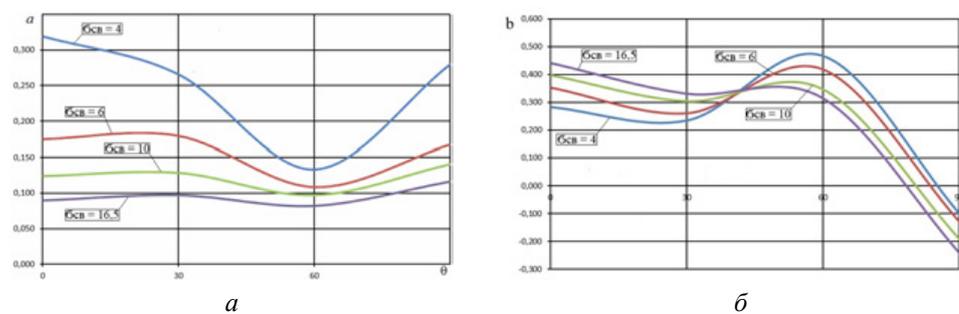


Рис. 5. Графики для определения коэффициентов a (а) и b (б) при $a = 1,8$ м

Вместо графиков, приведенных на рис. 4 и 5, и формулы (4) для определения расчетных значений угла внутреннего трения φ могут быть полезны поверхности вида $\varphi = f(R; \theta)$, построенные по результатам вычислений и приведенные на рис. 6.

Отметим, что графики, подобные тем, что приведены на рис. 4—6, построены для всех заявленных в работе значений диаметра круглой выработки. Результаты проведенных нами дополнительных расчетов показали, что, используя эти графические зависимости и метод линейной интерполяции, можно

определить расчетное значение угла внутреннего трения φ , отвечающее оговоренным выше условиям, для любых сочетаний численных значений переменных расчетных параметров. При этом разница в результатах, полученных при использовании этих графических зависимостей и при непосредственном расчете с помощью компьютерной программы [5], составляет не более 6,7 %.

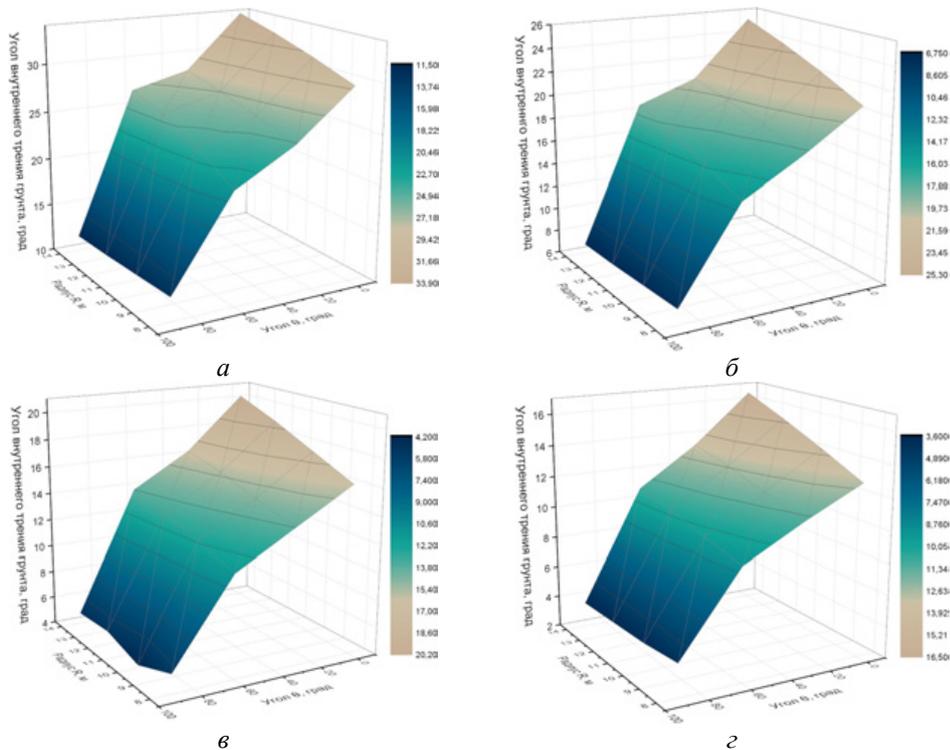


Рис. 6. Поверхности вида $\varphi = f(R; \theta)$ при $a = 1,8$ м и $\sigma_{св} = 4$ (а); $\sigma_{св} = 6$ (б); $\sigma_{св} = 10$ (в); $\sigma_{св} = 16,5$ (г)

Следует также сказать, что полученные графики позволяют решить и обратную задачу: по известным физико-механическим свойствам грунта определить величину R и θ , которые в данном случае будут определять так называемое безопасное расстояние от подошвы фундамента до выработки, на котором последняя будет устойчива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамчук В. П., Власов С. Н., Мостко В. М. Подземные сооружения. М.: ТА Инжиниринг, 2005. 464 с.
2. Coulomb C. Application des regles de maximus et minimis a quelques problemes de statique relatifs a L'architecture // Memoires de savants etrangers de L'Academie des sciences de Paris, 1773. 233 p.
3. Тетитор А. Н. Фундаменты : учеб. пособ. М.: Академия, 2010. 400 с.
4. Аксёнов С. А., Заручевных И. Ю. Проектирование фундаментов зданий и сооружений. Часть II. Расчет фундаментов мелкого заложения: учеб. пособ. Архангельск: ИД САФУ, 2014. 143 с.
5. Устойчивость (напряженно-деформированное состояние) : свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ : пат. Рос. Федерации № 2009613499 / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, М. Ю. Нестратов, Н. Н. Нестратов, Н. Н. Потапова, М. М. Степанов, А. Н. Ушаков ; опубл. 18.12.2009, Бюл. № 23 ; заявл. 19.05.2009 ; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 30.06.2009. 1 с.

6. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. М.; Л.: АН СССР, 1942. 207 с.
7. Базь Б. Д. Нормативное давление на естественное основание. Таблицы для расчета, Киев: Будівельник, 1965. 194 с.
8. Критерий безопасной эксплуатации и коэффициенты запаса оползнеопасных склонов / А. Н. Богомолов, С. И. Шиян, О. А. Богомолова, М. Ю. Нестратов, А. В. Соловьев // Збірник наукових праць. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво. Присвяч. пам'яті д-ра техн. наук, проф. О. Г. Онищенко. Полтава : [ПолтНТУ], 2010. Вып. 3(28). С. 49—54.
9. Богомолов А. Н., Богомолова О. А., Шиян С. И. О двух критериях устойчивости грунтовых откосов и склонов // Современные технологии в строительстве. Теория и практика : материалы Всерос. семинара-совещ. зав. каф. «Строит. пр-во» и междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию строит. фак. ПГТУ (г. Пермь, 22—23 сент. 2009 г.). Пермь : ПГТУ, 2009. С. 54—58.
10. Новый критерий оценки длительной устойчивости однородных откосов на основе анализа напряженно-деформированного состояния / А. Н. Богомолов, С. И. Шиян, М. Ю. Нестратов, А. В. Соловьев // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2009. Вып. 14(33). С. 5—12.

© Богомолов А. Н., Павлов Д. В., Богомолова О. А., Анисимов Л. А., 2015

Поступила в редакцию
в мае 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Расчет устойчивости незакрепленной подземной выработки круглого сечения, расположенной в активной зоне заглубленного ленточного фундамента / А. Н. Богомолов, Д. В. Павлов, О. А. Богомолова, Л. А. Анисимов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 40(59). С. 89—97.

Об авторах:

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

Павлов Дмитрий Вадимович — аспирант кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, banzaritcyn@mail.ru

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

Анисимов Леонид Алексеевич — д-р геол.-минерал. наук, профессор, профессор кафедры морских нефтегазовых сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, lanisimov@yahoo.com

A. N. Bogomolov, D. V. Pavlov, O. A. Bogomolova, L. A. Anisimov

CALCULATION OF STABILITY OF UNFIXED UNDERGROUND MINE OF CIRCULAR SECTION LOCATED IN ACTIVE ZONE OF BURIED STRIP FOUNDATION

The issue of determination of safe parameters of an underground mine of circular cross section located in active zone of buried strip foundation is considered. When conducting the research it is accepted that the soil of the foundation possesses properties of linearly elastic environment which is under Coulomb strength criterion. The idea of numerical research is that the authors can find the minimum values of the internal friction angle of the foundation soil, which guarantee absence of such points on the mine's contour where the chosen strength condition at the specified combination of numerical values of variable calculated parameters is satisfied. According to the criterion offered by the authors the mine in this case will be steady. As a result of the conducted researches the graphic dependences by means of which it is possible to define the required values of internal friction angle are determined, provided that numerical values of variable calculated parameters change in the limits specified in the work.

Key words: underworked base of strip foundation, underground mine of circular section, stress state of soil massif, strength condition, area of plastic deformations, stability of development, safe distance.

REFERENCES

1. Abramchuk V. P., Vlasov S. N., Mostko V. M. *Podzemnye sooruzheniya* [Undeground constructions]. Moscow, TA Engineering Publ., 2005. 464 p.
2. Coulomb C. Application des rigles de maximus et minimis a quelques problemes de statique relatifs a L'architecture. *Memoires de savants etrangers de L'Academlie des sciences de Paris*, 1773. 233 p.
3. Tetitor A. N. *Fundamenty : uchebnoe posobie* [Foundations : study guide]. Moscow, Akademiya Publ., 2010. 400 p.
4. Aksenov S. A., Zaruchevnykh I. Yu. *Proektirovanie fundamentov zdaniy i sooruzhenii. Chast' II. Raschet fundamentov melkogo zalozheniya: uchebnoe posobie* [Projecting of foundations of buildings and constructions. Part II. Design of shallow foundation : study guide]. Arkhangel'sk: ID SAFU Publ., 2014. 143 p.
5. Bogomolov A. N., Bogomolova O. A., Nestratov M. Yu., Nestratov N. N., Potapova N. N., Stepanov M. M., Ushakov A. N. *Ustoichivost' (napryazhenno-deformirovanoe sostoyanie)* [Stability (stress-strain state)]. Patent RF, no. 2009613499, 2009.
6. Sokolovskii V. V. *Statika sypuchei sredy* [Statics of loose medium]. Moscow, Leningrad, AN SSSR Publ., 1942. 207 p.
7. Baz' B. D. *Normativnoe davlenie na estestvennoe osnovanie. Tablitsy dlya rascheta* [Standard pressure on natural foundation. Calculation tables]. Kiev, Budivelnik Publ., 1965. 194 p.
8. Bogomolov A. N., Shiyani S. I., Bogomolova O. A., Nestratov M. Yu., Solov'ev A. V. [Criterion of Safe Operation and Coefficients of the Stock of Slip-off Slopes]. *Zbirnik naukovikh prats. Galuzeve Mashinobuduvannya, budivnitsvo*. Poltava, PoltNTU Publ., 2010. Iss. 3(28). Pp. 49—54. (In Russ.).
9. Bogomolov A. N., Bogomolova O. A., Shiyani S. I. [About Two Criteria of Stability of Soil Slopes and Slants]. *Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika* [Modern Technologies in Construction. Theory and Practice. Proc. of All-Russian Seminar, Perm, 22—23 Sep. 2009]. Perm, PSTU Publ., 2009. Pp. 54 — 58.
10. Bogomolov A. N., Shiyani S. I., Nestratov M. Yu., Solov'ev A. V. [The new criterion of evaluation of protracted stability of homogeneous slopes based on the analysis of tense deformed condition]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2009, iss. 14(33), pp. 5—12. (In Russ.).

For citation:

Bogomolov A. N., Pavlov D. V., Bogomolova O. A., Anisimov L. A. [Calculation of stability of unfixed underground mine of circular section located in active zone of buried strip foundation]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 40(59), pp. 89—97.

About authors:

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

Pavlov Dmitrii Vadimovich — Postgraduate student of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, banzaritcyn@mail.ru

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

Anisimov Leonid Alekseevich — Doctor of Geological and Mineral Science, Professor, Professor of Sea Oil and Gas Constructions Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, l.anisimov@yahoo.com

УДК 624.131.23

**А. Н. Богомолов^{а,б}, Г. М. Скибин^в, Ю. И. Олянский^а, С. И. Махова^а,
А. Ф. Алексеев^в, Б. Ф. Галай^д**

^а *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

^б *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

^в *Южно-Российский государственный политехнический университет*

^г *Уральский государственный горный университет*

^д *Северо-Кавказский федеральный университет*

ОЦЕНКА ПРОСАДОЧНОСТИ ЛЕССОВЫХ ОСНОВАНИЙ ПОЛЕВЫМИ И ЛАБОРАТОРНЫМИ МЕТОДАМИ

На примере лессовых толщ территории Республики Молдова дана сравнительная оценка различных полевых и лабораторных методов определения начального просадочного давления лессовых пород и величина просадки лессовой толщи от собственного веса при замачивании.

Ключевые слова: лессовые породы, величина относительной просадочности, начальное просадочное давление, просадка лессовой толщи.

Замачивание котлованов. Определение просадки от собственного веса грунта является важнейшей задачей инженерно-геологических изысканий для строительства. Эта задача может быть решена и в большинстве случаев решается с использованием лабораторных данных — компрессионных испытаний. Однако, как показала практика, полученные результаты не всегда отвечают истинным просадкам сооружений, имеющим место в процессе их эксплуатации.

Методика определения просадки лессовой толщи от собственного веса в полевых условиях дана в [1] и закреплена в ряде нормативных документов (СНиП II-Б-1.62; СНиП II-15-74; СНиП 2.02.01-83). Основные положения этой методики заключаются в следующем. Опытные котлованы должны быть прямоугольной или квадратной формы с размерами сторон, равными мощности просадочной толщи, но не менее 15 м. Замачивание осуществляется до полного промачивания всей толщи грунтов, что составляет при мощности 20 м 1...3 мес. В последнее время данная методика претерпела некоторые изменения. Например, сотрудниками Днепропетровского института инженеров транспорта на основании анализа результатов работ по опытному замачиванию котлованов на территории Днепропетровска был сделан вывод, что на величину просадки лессовой толщи большое влияние оказывает площадь замачивания. Для полной реализации просадки размеры этой площади должны не менее чем вдвое превышать мощность лессовой толщи. Узбекскими геологами [2] на основании изучения результатов проведенных опытов по Средней Азии указывается, что котлованы должны быть только квадратной формы с размерами сторон, равными половине мощности просадочной толщи. Однако в целом, несмотря на некоторые изменения, данная методика в настоящее время является общепринятой и используется большинством проектно-изыскательских организаций.

Институтом МолдГИИНТИЗ по данной методике выполнено замачивание котлована на площадке телевизионного завода «Альфа» [4].

Котлован № I. Площадка телевизионного завода расположена на западной окраине города в микрорайоне Буюкань и в геоморфологическом отношении представляет водораздел между р. Бык и ее притоком Дурлештским ручьем. Лессовый покров элювиально-делювиально-пролювиального типа достигает на водоразделе мощности 20...22 м и уменьшается по склону вниз до 2...3 м. В литологическом отношении представлен супесями с числом пластичности 0,02...0,06, легкими и средними суглинками с числом пластичности 0,08...0,12. Содержание фракций: песок 25,0...38,0 %; пыль 35,0...52,0 %; глина 9,0...18,0 %. Лессовая толща подстилается повсеместно песками неогена мощностью 15...20 м. Подземные воды в пределах лессовых грунтов и подстилающих песков отсутствуют. Возможная просадка от собственного веса грунта по результатам компрессионных испытаний методом «двух кривых» в районе составляет 6...25 см, по результатам компрессионных испытаний методом «одной кривой» — 0...6 см.

Площадка опытного котлована располагалась в приводораздельной части. Мощность лессовой толщи составляет 19,5...20,0 м. До глубины 5,5 м это средние суглинки причерноморского яруса, глубже супеси и легкие суглинки бугского и удайского ярусов. Мощность просадочной толщи по результатам компрессионных испытаний методом «двух кривых» составляет 18...19 м, по схеме «одной кривой» — 10,5 м. Возможная просадка от собственного веса грунта по лабораторным данным (методом «двух кривых») составила 10,1; 13,8 и 29,6 см по трем скважинам, расположенным по периметру котлована. Физико-механические характеристики грунтов опытного котлована приведены в табл. 1. Сооружение котлована производилось в соответствии с инструкцией [1]. Форма принята прямоугольная с размерами сторон 23 × 26 м. Котлован сооружался за счет снятия растительного слоя на глубину 0,8...1,2 м. Для улучшения условий замачивания по дну котлована пройдено 36 скважин диаметром 127 мм по сетке 4 × 4 м. Все скважины заполнены гравием и щебнем. Для наблюдения за осадкой дна сооружено 30 поверхностных марок.

Замачивание продолжалось в течение 78 сут. Общий расход воды за время замачивания — 17 тыс. м³. Средняя осадка дна котлована к концу замачивания составила 2...4 мм.

Метод ускоренного замачивания котлованов небольшой площади предложен в 1981 г. Методика этих исследований разрабатывалась на просадочных грунтах Таджикистана под руководством В. И. Крутова [3]. Новая методика характеризуется следующими основными преимуществами. Широко применяемый до настоящего времени метод определения типа грунтовых условий по результатам компрессионных испытаний дает вполне удовлетворительные результаты при расчетных просадках до 5 см и более 20...25 см. В этих случаях ожидаемая величина просадок достаточно удовлетворительно моделируется путем опытного замачивания котлованов с размерами сторон не менее мощности просадочной толщи, но не менее 15 м. Необходимость замачивания опытных котлованов больших размеров приводит к значительному увеличению объемов работ, требуемого количества воды, сроков выполнения, трудоемкости и стоимости. В то же время замачивание котлованов небольших размеров (4...6 м) позволяет значительно упростить работы и резко сократить расход воды и времени на замачивание. Так, по свидетельствам авторов [2], использование указанного метода в условиях Таджикистана обеспечило снижение расхода воды в 10...20 раз, времени — в 3...5 раз; ве-

личины же просадок оказываются достаточно близкими к значениям просадок, имеющим место в котлованах с размерами сторон не менее мощности просадочной толщи.

Работы по изучению просадочности лессовых грунтов путем замачивания опытных котлованов небольших размеров проводились институтом МолдГИИНТИЗ. Для производства работ выбраны три вновь застраиваемые района города, характеризующиеся широким распространением просадочных грунтов: Буюкань, Будешть, Ботаника. Выполнение работ по ускоренному замачиванию котлованов в двух первых районах позволило сделать выводы о сходимости результатов, полученных по общепринятой методике и новой. Сооружение опытных котлованов производилось в соответствии с [3]. В результате анализа природных условий площадок и физико-механических свойств грунтов была принята восьмиугольная форма котлована с размерами сторон, равными 1 м. Площадь котлована составила 5 м, сооружение его осуществлялось за счет снятия почвенного слоя на глубину около 1 м. Для исключения влияния окружающего неувлажненного массива на просадку грунта и уменьшения контакта между ними котлован по периметру был обрзан на всю мощность просадочной толщи при помощи специальных ножей. Для облегчения погружения ножей в середине каждой стороны восьмиугольника предварительно пробурены лидерные скважины. Погружение ножей осуществлялось при помощи специального оборудования, применяемого для забивки инвентарных свай: копровая установка на базе станка УГБ-50М с молотом массой 400 кг. По дну котлована пробурены 17 дренажных скважин диаметром 127 мм на глубину 15 м. Дренажные и лидерные скважины заполнялись хорошо дренирующим песчаным материалом, а прорезь по периметру котлована — тяжелым глинистым раствором. Для наблюдения за осадкой поверхности как в котловане, так и за его пределами по двум лучам установлены 20 поверхностных марок.

Котлован № 2 (район Буюкань). Инженерно-геологические особенности района приведены ранее при описании результатов замачивания котлована № 1 по общепринятой методике. Площадка опытного котлована № 2 выбрана на расстоянии около 100 м от котлована № 1 и расположена по бул. Албэ-Юлие, вблизи телевизионного завода. Лессовая толща площадки имеет мощность около 17,5 м и до глубины 5,5 м представлена средними суглинками и ископаемой почвой современного отдела, ниже до глубины 10 м залегают супеси бугского яруса, которые подстилаются легкими суглинками с прослойками супесей удайского и прилукского ярусов. Физические характеристики и просадочные свойства грунтов по указанным ярусам приведены в табл. 2. Мощность просадочной толщи по результатам компрессионных испытаний достигает 16... 17 м. Возможная величина просадки от собственного веса грунта, рассчитанная по результатам компрессионных испытаний методом «двух кривых», составила 9,7 и 10,0 см, определенная по монолитам соответственно из шурфа и скважины диаметром 146 мм.

Замачивание котлована продолжалось 14 сут. На протяжении всего времени замачивания уровень воды в котловане поддерживался на высоте 0,3...0,5 м от его дна. Всего в котлован было залито около 145 м³ воды. Средняя осадка дна котлована за это время составила 23 мм, причем значительная ее часть (около 90 %) произошла к концу четвертых суток после начала замачивания. Полная осадка дна завершилась к концу шестых суток. Осадку по-

верхностных марок за пределами контуров котлована на расстоянии 0,5...1,0 м от последнего составила 2...3 мм. После прекращения подачи воды в котлован в пределах его контуров была пробурена скважина 1 для определения глубины и степени замачивания грунтов. Скважиной до глубины 15 м грунтовых вод не обнаружено. Распределение влажностей лессовых грунтов по разрезу толщи, приведенное в табл. 2, свидетельствует о повышенной по сравнению с первоначальной, до замачивания, влажности. В зависимости от литологического состава пород она увеличилась на 0,04...0,07.

Котлован № 3 (район Вудешть). Территория района расположена в северо-западной части города и также представляет собой водораздел между двумя балками: Цыганской к Будештской. Лессовый покров элювиально-делювиально-пролювиального типа представлен средними, реже — легкими и тяжелыми суглинками. Максимальная мощность толщи на водоразделе достигает 20...30 м. Подстилающие породы — глины неогена. Содержание фракций лессовых грунтов следующее: песок — 37,0...54,2 %; пыль — 36,1...44,5 %; глина — 14,0...30,5 %. Характерным для данной территории является несовпадение результатов компрессионных испытаний по методам «одной» и «двух кривых». Возможная просадка от веса грунта с использованием результатов первой методики составляет 0...5 см, второй 10,0...25,5 см.

Площадка опытного котлована расположена в непосредственной близости от ранее замачиваемого котлована № 5. Лессовый покров площадки достигает мощности 24,0...24,5 м. До глубины 13 м — это преимущественно легкие и средние суглинки причерноморского и бугского ярусов, ниже — средние и тяжелые суглинки удайского и тясминского ярусов. Грунты до глубины 14...15 м обладают просадочными свойствами. Отдельные компрессионные испытания показали наличие просадочных свойств также у грунтов, залегающих глубже 15 м, начальное просадочное давление этих образцов составило 0,25...0,36 МПа. Возможная просадка от собственного веса грунта по результатам компрессионных испытаний методом «двух кривых» составляет 10,5...18,7 см (табл. 3). Замачивание котлована продолжалось в течение 13 сут. За это время в котлован было подано около 78 м³ воды. Полная осадка дна произошла на седьмой день после замачивания и достигла 24 мм, причем 70 % ее реализовалось уже на вторые сутки. После прекращения подачи воды в котловане была пробурена скважина с целью изучения степени увлажнения грунтов. Результаты показали, что степень влажности увеличивается с глубиной от 0,76...0,81 до 0,97, уровень подземных вод обнаружен на глубине 15 м.

Котлован № 4 (микрорайон Ботаника). Жилой массив Ботаника расположен на южной окраине Кишинева и в геоморфологическом отношении представляет собой склон водораздела между реками Бык и Ишновец. Мощность лессового покрова в пределах района составляет 5...30 м, причем максимальные ее величины приурочены к средним частям склона. В литологическом отношении лессовый покров сложный. В верхней части залегают супеси и легкие суглинки, которые к основанию толщи сменяются красно-бурыми суглинками и глинами. Отсутствие в толще явно выраженных и хорошо выдержанных по площади горизонтов ископаемых почв не позволяет расчленивать ее. В гранулометрическом отношении грунты не отличаются от остальной территории города, это в основном высоко песчанистые отложения со средними значениями содержания пылеватой фракции 35...45 %.

Площадка опытного котлована расположена в верхней части склона водораздела по ул. Индепенденцей. Мощность лессовой толщи достигает 28 м. До глубины 18...19 м это преимущественно супеси и легкие суглинки (Q_{3-4}), ниже — тяжелые суглинки и глины (Q_{1-2}). Просадочными свойствами обладает верхняя 15...16-метровая толща пород. Физико-механические характеристики грунтов приведены в табл. 4. Возможная просадка толщи от собственного веса, рассчитанная по результатам компрессионных испытаний методом «двух кривых», составляет 22,8 и 23,8 см соответственно по монолитам, отобранным из шурфа, и скважинам диаметром 146 мм. Замачивание котлована осуществлялось на протяжении 10 суток. За этот период в него подано около 80 м воды. Полная осадка дна котлована составляет 14 мм, 70 % общей деформации реализовалось на четвертые сутки, в последующие 6 сут деформации дна котлована не наблюдалось, полная же осадка произошла на 13-е сутки. Контрольное бурение скважины после завершения опыта показало, что лессовая толща до глубины 16 м характеризуется повышенной (на 0,06...0,08) влажностью, что соответствует степени влажности 0,60...0,77.

Котлован № 5 (район Будешть). Котлован расположен в непосредственной близости от площадки котлована № 3, что дает возможность сопоставить результаты опыта. Сооружение и замачивание котлована производилось в соответствии с общепринятой методикой. Котлован прямоугольной формы с размером сторон, равным 20 м, что соответствует примерно мощности просадочной толщи. По дну котлована пробурено 16 скважин глубиной 20 м с заполнением их дренирующим материалом — крупнозернистым песком. Котлован сооружен за счет снятия почвенного слоя на глубину 0,7...1,0 м. Замачивание производилось в течение 81 сут., на что израсходовано 11,2 тыс. м³ воды. Осадка поверхностных и глубинных марок за весь период замачивания не зафиксирована. Отдельные поверхностные марки в результате набухания верхнего слоя суглинков поднялись на 5 мм. Контрольным бурением установлено, что в результате замачивания котлована на глубине 11,0...12,5 м образовался водоносный горизонт. Степень влажности грунтов выше его уровня составила 0,55...0,85.

Котлован № 6 (с. Баурчи). Замачивание котлована выполнено институтом Молдгипроводхоз. Площадка опытного котлована расположена в южной части региона на водоразделе рек Ялпуг и Баурчи. Мощность лессового покрова достигает 30 м. Это преимущественно средние и тяжелые суглинки элювиально-делювиально-эолового происхождения (Q_{1-4}). Лессовая толща подстилается глинами миоцена. Подземные воды до начала замачивания залегали на глубине 25,8 м. Просадочными свойствами обладают грунты до глубины 20,5 м. Значение относительной просадочности составляет 0,013...0,055. Просадка от собственного веса грунта по результатам компрессионных испытаний методом «двух кривых» составляет 25,9 см.

Для производства опыта вырыт котлован размером 20 × 30 м и глубиной 1 м. По дну котлована пробурено 35 дренажных скважин по сетке 4 × 4 м. Для наблюдения за осадкой установлено 8 глубинных и 55 поверхностных марок.

Замачивание осуществлялось в течение 193 сут. Начало опускания дна зафиксировано на 30-е сутки после начала опыта. Наибольшая скорость осадки отмечена в период между 40-ми и 110-ми сутками. Полная осадка дна к концу опыта достигла 33 см. В результате замачивания на 70...80-е сутки начался подъем уровня подземных вод. На 110-е сутки его глубина достигла 11,8 м.

Таблица 1

Физико-механические характеристики грунтов опытного котлована № 1 (Кишинев, микрорайон Буюкань)

Глубина, м	Индекс и состав грунтов	Физическая характеристика						Просадочные свойства			Влажность после зама- чивания	Степень влажности после зама- чивания
		W	W _L	W _p	J _p	n, %	e	ρ ₀ , г/см ³	по двум кривым	по одной кривой		
								ξ _{sv} при 0,3 МПа	начальное просадочное давление, МПа	ξ _{sv} при 0,3 МПа		
0,8...5,5	Q ₄ суг- линок серо- желтый	$\frac{0,15}{12}$	$\frac{0,31}{13}$	$\frac{0,18}{13}$	$\frac{0,13}{13}$	$\frac{48,9}{13}$	$\frac{0,961}{13}$	$\frac{1,58}{13}$	$\frac{0,12}{13(1)}$	$\frac{0,041}{6}$	$\frac{0,20}{8}$	0,56
5,5...10,5	Q ₃ супесь палево- желтая	$\frac{0,08}{21}$	$\frac{0,21}{21}$	$\frac{0,17}{20}$	$\frac{0,04}{20}$	$\frac{42,9}{18}$	$\frac{0,754}{18}$	$\frac{1,56}{18}$	$\frac{0,14}{16(4)}$	$\frac{0,014}{1(9)}$	$\frac{0,15}{10}$	0,53
10,5...13,5	Q ₃ суг- линок буро- желтый	$\frac{0,12}{6}$	$\frac{0,26}{6}$	$\frac{0,17}{6}$	$\frac{0,09}{6}$	$\frac{43,8}{6}$	$\frac{0,786}{6}$	$\frac{1,69}{6}$	$\frac{0,21}{4(3)}$	$\frac{0,036}{6}$	$\frac{0,17}{6}$	0,58
13,5...16,0	Q ₃ супесь буро- желтая	$\frac{0,07}{10}$	$\frac{0,20}{10}$	$\frac{0,16}{10}$	$\frac{0,04}{10}$	$\frac{42,1}{8}$	$\frac{0,724}{8}$	$\frac{1,68}{8}$	$\frac{0,11}{6(3)}$	$\frac{0,024}{8}$	$\frac{0,17}{6}$	0,63
16,0...18,0	Q ₃ суг- линок желто- бурый	$\frac{0,13}{3}$	$\frac{0,26}{3}$	$\frac{0,17}{3}$	$\frac{0,09}{3}$	$\frac{41,1}{3}$	$\frac{0,724}{3}$	$\frac{1,76}{3}$	$\frac{0,09}{4(3)}$	$\frac{0,017}{6}$	$\frac{0,14}{2}$	0,52
18,0...20,0	Q ₂ супесь желтая	$\frac{0,08}{7}$	$\frac{0,21}{7}$	$\frac{0,13}{7}$	$\frac{0,04}{7}$	$\frac{40,7}{6}$	$\frac{0,695}{6}$	$\frac{1,66}{6}$	$\frac{0,09}{4(3)}$	$\frac{0,017}{6}$	$\frac{0,13}{3}$	0,45

Примечание. В числителе — среднее значение; в знаменателе — количество определений; в скобках — количество непросадочных образцов.

Таблица 2

Физико-механические характеристики грунтов опытного котлована № 2 (Кишинев, микрорайон Буюкань)

Глубина, м	Индекс и состав грунтов	Физическая характеристика							Просадочные свойства				Влажность после замачивания	Степень влажности после замачивания
		W	W _L	W _p	J _p	n, %	e	ρ ₀ , г/см ³	по двум кривым	по одной кривой	ξ _{st} при 0,3 МПа	начальное просадочное давление, МПа		
0,7...3,5	Q _{4ts} суглинок серо-желтый	$\frac{0,16}{9}$	$\frac{0,28}{9}$	$\frac{0,17}{9}$	$\frac{0,11}{9}$	$\frac{48,2}{15}$	$\frac{0,92}{3}$	$\frac{1,61}{15}$	$\frac{0,062}{6}$	$\frac{0,13}{6}$	$\frac{0,050}{6}$	$\frac{0,20}{3}$	0,58	
3,5...5,5	Q _{4d} суглинок коричне-невый	$\frac{0,19}{15}$	$\frac{0,30}{15}$	$\frac{0,18}{15}$	$\frac{0,12}{15}$	$\frac{49,4}{15}$	$\frac{0,95}{7}$	$\frac{1,63}{15}$	$\frac{0,044}{8}$	$\frac{0,2}{8}$	$\frac{0,037}{8}$	$\frac{0,24}{2}$	0,66	
5,5...10,0	Q _{3bg} супесь палево-желтая	$\frac{1,10}{25}$	$\frac{0,20}{25}$	$\frac{0,18}{25}$	$\frac{0,02}{25}$	$\frac{42,5}{15}$	$\frac{0,73}{9}$	$\frac{1,69}{25}$	$\frac{0,029}{10}$	$\frac{0,13}{10}$	$\frac{0,026}{9(1)}$	$\frac{0,17}{5}$	0,61	
10,0...15,0	Q _{3id} суглинок серо-желтый	$\frac{0,14}{7}$	$\frac{0,24}{7}$	$\frac{0,17}{7}$	$\frac{0,07}{7}$	$\frac{43,8}{25}$	$\frac{0,77}{9}$	$\frac{1,72}{7}$	$\frac{0,31}{8}$	$\frac{0,14}{8}$	$\frac{0,117}{6(2)}$	$\frac{0,18}{5}$	0,62	
15,0...17,5	Q _{3p} суглинок коричне-невый	$\frac{0,13}{5}$	$\frac{0,22}{5}$	$\frac{0,16}{5}$	$\frac{0,06}{5}$	$\frac{42,9}{5}$	$\frac{0,75}{4}$	$\frac{1,73}{5}$	$\frac{---}{(5)}$	---	$\frac{0,12}{2(1)}$	---	---	

Примечание. В числителе — среднее значение; в знаменателе — количество определений; в скобках — количество непросадочных образцов.

Таблица 3
Физико-механические характеристики грунтов опытных котлованов № 3 и 5 (Кишинев, микрорайон Бүдешть)

Глубина, м	Индекс и состав грунтов	Физическая характеристика							Просадочные свойства		Влажность после замачивания		Степень влажно- сти после зама- чивания	
		W	W _L	W _p	J _p	n, %	e	ρ ₀ , г/см ³	ξ _{sv} при 0,3 МПа	по «двум кривым» начальное про- садочное дав- ление, МПа	котло- вана №3	котло- вана №4	котло- вана №3	котло- вана №4
1,0...4,8	Q _{4ts} сугли- нок серо- желтый	$\frac{0,12}{8}$	$\frac{0,26}{8}$	$\frac{0,16}{8}$	$\frac{0,10}{8}$	$\frac{43,9}{8}$	$\frac{0,788}{8}$	$\frac{1,70}{8}$	$\frac{0,052}{8}$	$\frac{0,11}{8}$	$\frac{0,24}{6}$	$\frac{0,19}{3}$	0,82	0,66
4,8...6,2	Q _{4d} сугли- нок корич- невый	$\frac{0,16}{4}$	$\frac{0,30}{4}$	$\frac{0,19}{4}$	$\frac{0,11}{4}$	$\frac{48,4}{4}$	$\frac{0,940}{4}$	$\frac{1,63}{4}$	$\frac{0,044}{4}$	$\frac{0,09}{4}$	$\frac{0,26}{1}$	$\frac{0,19}{5}$	0,76	0,55
6,2...13,0	Q _{3bg} сугли- нок палево- желтый	$\frac{0,14}{13}$	$\frac{0,27}{13}$	$\frac{0,17}{13}$	$\frac{0,10}{13}$	$\frac{42,2}{13}$	$\frac{0,736}{13}$	$\frac{1,78}{13}$	$\frac{0,040}{7(2)}$	$\frac{0,13}{7(2)}$	$\frac{0,22}{6}$	$\frac{0,17}{14}$	0,81	0,63
13,0...14,4	Q _{3v} сугли- нок бурый	$\frac{0,18}{2}$	$\frac{0,30}{2}$	$\frac{0,15}{2}$	$\frac{0,14}{2}$	$\frac{42,5}{2}$	$\frac{0,739}{2}$	$\frac{1,82}{2}$	$\frac{0,010}{1(1)}$	$\frac{0,25}{1(1)}$	$\frac{0,23}{2}$	$\frac{0,22}{3}$	0,83	0,76
14,4...16,2	Q _{3id} сугли- нок желтый	$\frac{0,14}{2}$	$\frac{0,26}{2}$	$\frac{0,15}{2}$	$\frac{0,11}{2}$	$\frac{40,1}{2}$	$\frac{0,670}{2}$	$\frac{1,85}{2}$	$\frac{0,023}{3(1)}$	$\frac{0,25}{3(1)}$	$\frac{0,24}{1}$	$\frac{0,21}{2}$	0,97	0,85
16,2...18,3	Q _{3p} сугли- нок корич- невый	$\frac{0,18}{5}$	$\frac{0,32}{5}$	$\frac{0,17}{5}$	$\frac{0,15}{5}$	$\frac{41,3}{5}$	$\frac{0,705}{5}$	$\frac{1,88}{5}$	$\frac{—}{(4)}$	$\frac{0,32}{—}$	—	—	—	—
18,3...22,5	Q _{3ts} сугли- нок серо- желтый	$\frac{0,16}{5}$	$\frac{0,31}{5}$	$\frac{0,16}{5}$	$\frac{0,15}{5}$	$\frac{39,4}{4}$	$\frac{0,651}{4}$	$\frac{1,92}{4}$	$\frac{0,019}{1(3)}$	$\frac{0,27}{2(2)}$	—	—	—	—

Примечание. В числителе — среднее значение; в знаменателе — количество определений; в скобках — количество непросадочных образцов.

Таблица 4

Физико-механические характеристики грунтов опытного котлована № 4 (Кишинев, микрорайон Ботаника)

Глубина, м	Индекс и состав грунтов	Физическая характеристика						Просадочные свойства				Влажность после за- мачивания	Степень влаж- ности после замачивания
		W	W _L	W _p	J _p	n, %	e	ρ ₀ , г/см ³	по двум кривым		по од- ной кривой		
									ξ _{st} при 0,3 МПа	начальное просадочное давление, МПа			
1,0...5,5	Q ₃₋₄ сугли- нок серо- желтый	$\frac{0,14}{12}$	$\frac{0,28}{12}$	$\frac{0,17}{13}$	$\frac{0,11}{13}$	$\frac{49,3}{12}$	$\frac{0,960}{12}$	$\frac{1,56}{12}$	$\frac{0,059}{12}$	$\frac{0,08}{12}$	$\frac{0,052}{12}$	$\frac{0,21}{6}$	0,60
5,5...9,0	Q ₃ супесь желтая	$\frac{0,08}{10}$	$\frac{0,22}{11}$	$\frac{0,18}{10}$	$\frac{0,04}{11}$	$\frac{49,4}{5}$	$\frac{0,793}{5}$	$\frac{1,63}{5}$	$\frac{0,034}{8}$	$\frac{0,14}{8}$	$\frac{0,023}{7(1)}$	$\frac{0,21}{4}$	0,72
9,0...13,5	Q ₃ суглинок желтый	$\frac{1,10}{13}$	$\frac{0,23}{13}$	$\frac{0,15}{13}$	$\frac{0,08}{12}$	$\frac{43,6}{10}$	$\frac{0,773}{10}$	$\frac{1,67}{10}$	$\frac{0,047}{8}$	$\frac{0,10}{8}$	$\frac{0,045}{8}$	$\frac{0,22}{4}$	0,77
13,5...19,0	Q ₁₋₂ супесь желто-бурая	$\frac{0,09}{9}$	$\frac{0,21}{9}$	$\frac{0,16}{9}$	$\frac{0,05}{9}$	$\frac{43,3}{4}$	$\frac{0,763}{4}$	$\frac{1,66}{4}$	$\frac{0,024}{4}$	$\frac{0,17}{4}$	$\frac{0,029}{3(1)}$	$\frac{0,22}{2}$	0,77
19,0...28,0	Q ₁₋₂ сугли- нок желто- бурый	$\frac{0,18}{10}$	$\frac{0,32}{10}$	$\frac{0,18}{10}$	$\frac{0,14}{9}$	$\frac{42,2}{8}$	$\frac{0,730}{8}$	$\frac{1,76}{7}$	$\frac{—}{(4)}$	$\frac{0,39}{1(3)}$	—	—	—

Примечание. В числителе — среднее значение; в знаменателе — количество определений; в скобках — количество непросадочных образцов.

Статические нагрузки на штамп. Испытание просадочных грунтов статическими нагрузками с замачиванием в полевых условиях позволяет значительно полнее моделировать просадочный процесс, происходящий в основаниях зданий и сооружений. Изучением методики штамповых испытаний лессовых грунтов в 1960-е и начале 1970-х гг. занимались А. А. Григорян, Э. Я. Садэтова, И. Е. Раевский и др. На основании их исследований в общих чертах была разработана методика таких испытаний, основные положения которой заключаются в том, что наиболее оптимальным вариантом штампа является круглый штамп площадью 5000 см². Отмечено также, что величина активной зоны зависит от нагрузки на штамп и повышается с увеличением последней. В последующие годы были выполнены исследования, позволившие детально разработать методику штамповых испытаний грунтов, в том числе и просадочных, и закрепить ее в специальных рекомендациях [4].

Институтом МолдГИИИТИЗ в процессе производства инженерно-геологических изысканий на отдельных строительных площадках Республики выполняются испытания лессовых грунтов статическими нагрузками в полевых условиях на стандартный штамп. Обобщение данных этих исследований позволит изучить просадочные свойства различных генетических типов грунтов, что, в свою очередь, будет способствовать более объективному инженерно-геологическому районированию лессового покрова территории, а также получению корректировочных коэффициентов, связывающих показатели просадочности грунтов, определенных в полевых и лабораторных условиях.

Для производства опыта использован круглый стандартный штамп, устанавливаемый в специально пройденной дудке диаметром 900 мм и глубиной 4...6 м. Замачивание пород в основании штампа осуществлялось через дно дудки и дренажные скважины, пройденные вокруг штампа на расстоянии около 0,5 м от последнего. Глубины дренажных скважин на 1,5 м превышали глубину установки штампа. Давление на забой передавалось ручным гидравлическим домкратом. Отпор пород воспринимался устройством, состоящим из винтовых анкерных свай, снабженных лопастями, и упорных балок. Испытания пробными статическими нагрузками выполнялись по упрощенному методу и методу «двух кривых». Опыт по упрощенному методу заключался в обжатии пород природной влажности до нагрузки 0,25 МПа, приложение нагрузок — ступенчатое через 0,025 МПа. После условной стабилизации деформации при нагрузке 0,25 МПа производилось замачивание пород. По достижении условной стабилизации осадки штампа осуществлялось дальнейшее обжатие грунтов до нагрузки 0,30...0,40 МПа. Такая методика испытаний позволяет получить при минимальных трудовых затратах две ветви, характеризующие зависимость осадки штампа от нагрузки: «сухую» и «водонасыщенную». Они получаются путем продления первой вправо, а второй влево от начала графика.

Испытания по методу «двух кривых» проводились параллельно в двух дудках на расстоянии 4...5 м одна от другой, штампы устанавливались на одинаковой глубине. Один из них испытывал грунты природной влажности, другой — водонасыщение. Испытания проводились также до нагрузки 0,30...0,40 МПа. За начальное просадочное давление принималась нагрузка условного предела пропорциональности, при неявно выраженном пределе — нагрузка, при которой просадочная деформация в основании штампа превышала значение S , равное $0,005 h_g$, где h_g — величина активной зоны, определяемая диаметром штампа и нагрузкой.

Просадочные свойства лессовых грунтов региона изучались в пяти районах, характеризующихся распространением отложений различных генетических типов. Террасовые отложения северной части междуречья Прут — Днестр изучались на площадках строящегося молдавского металлургического завода в г. Рыбница (долина Днестра) и жилого микрорайона в северной части г. Унгень (долина Прута). Элювиально-делювиальные и пролювиальные породы Центрально-Молдавской возвышенности охарактеризованы по результатам опытов на площадках жилых микрорайонов Кишинева. Террасовые грунты юга региона описаны по результатам опытных нагрузок на площадках жилых массивов в Бендерах и Тирасполе (долина Днестра). Всего выполнено свыше 40 опытов.

Анализ данных, приведенных в табл. 5, показывает, что наименее выраженными просадочными свойствами обладают элювиально-делювиальные и пролювиальные грунты Центрально-Молдавской возвышенности (Кишинева). Обработка результатов более чем 20 опытов свидетельствует об уменьшении просадочных свойств этих грунтов от супесей к тяжелым суглинкам. Дополнительная осадка штампа при нагрузке 0,25 МПа для супесей и легких суглинков составляет в среднем 12,2...14,1 мм, начальное просадочное давление 0,08...0,16 МПа. В то же время для средних и тяжелых суглинков эти значения составляют соответственно 0,9...4,7 мм и 0,16...0,29 МПа. Супеси и легкие суглинки по усредненному графику зависимости осадки штампа от нагрузки (рис.) больше напоминают «истинно» просадочные грунты, чем глинистые разности грунтов района.

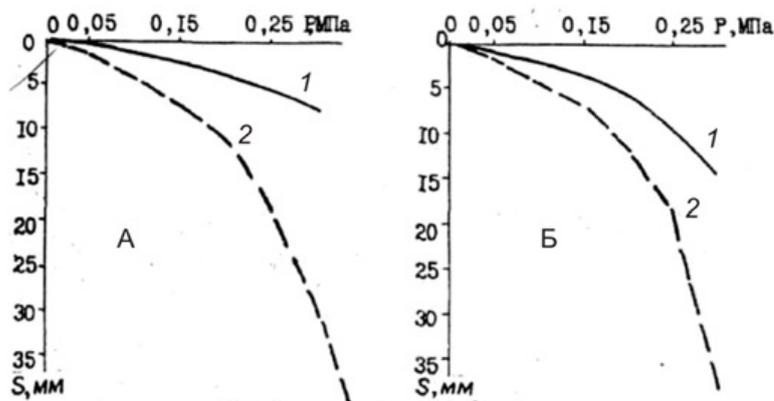
Таблица 5

Результаты замачивания лессовых грунтов в основании штампа

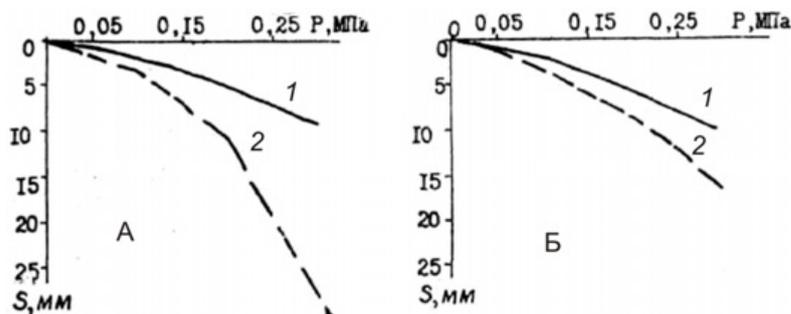
Местоположение площадок	Геологический индекс	Литологический состав грунтов			
		Супесь	Легкий суглинок	Средний суглинок	Тяжелый суглинок
Рыбница	dQ_{3-4}	$0,2 \frac{6,9}{18,1} 1$	$0,05 \frac{5,7}{12,7} 5$	$0,08 \frac{6,6}{12,7} 3$	—
Унгень	dQ_{3-4}	—	$0,22 \frac{5,9}{13,4} 4$	—	—
Кишинева	$ed(p)Q_{3-4}$	$0,08 \frac{6,9}{18,1} 7$	$0,16 \frac{7,0}{12,2} 4$	$0,29 \frac{4,9}{2,9} 4$	$0,16 \frac{9,3}{4,7} 6$
Бендер	$d(eol)Q_{3-4}$	—	$0,11 \frac{12,9}{57,7} 4$	—	$0,21 \frac{7,3}{5,2} 1$
Тирасполь	$d(eol)Q_{3-4}$	—	$0,17 \frac{10,9}{25,7} 1$	$0,10 \frac{9,5}{20,3} 2$	—

Примечание. В числителе — осадка штампа до замачивания; в знаменателе — осадка штампа в процессе замачивания, мм; слева — начальное просадочное давление, МПа; справа — количество опытов.

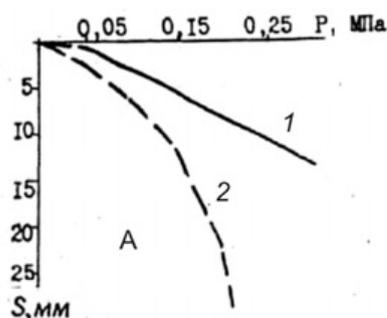
Рыбница dQ_{3-4}



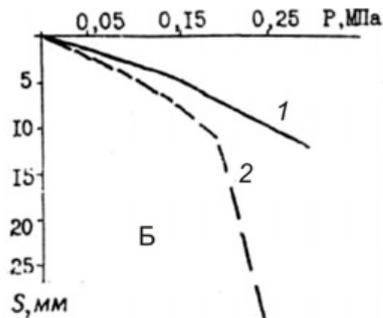
Кишинев $ed(p)Q_{3-4}$



Бендер $d(eol)Q_{3-4}$



Тирасполь $d(eol)Q_{3-4}$



Усредненные графики зависимости осадка штампа S от нагрузки P ; А — супеси и легкие суглинки; Б — средние и тяжелые суглинки; 1, 2 — грунты природной влажности и водонасыщенные

Аналогичной закономерностью в изменении просадочности характеризуются террасовые грунты северной части региона. Усредненные графики зависимости осадка штампа от нагрузки (Рыбница) свидетельствуют о наличии явно выраженных просадочных свойств у грунтов различных литологических типов от супесей к средним суглинкам. Здесь также наблюдается некоторое увеличение начального проселочного давления и уменьшение дополнитель-

ной осадки штампа от легких к более тяжелым разностям лессовых грунтов. Характерными являются несколько более выраженные просадочные свойства грунтов покрова Днестровских террас по сравнению с покровом Прутских террас в верхнем течении рек. Так, начальное просадочное давление средних суглинков из района Унгень примерно в 4 раза превышает его для аналогичных грунтов Рыбницы. Последнее обстоятельство уже подчеркивалось нами при анализе компрессионных данных. Наиболее выраженными просадочными свойствами обладают лессовые грунты южного Приднестровья. Несмотря на близкие значения начального просадочного давления лессовых грунтов южного и среднего Приднестровья, величина дополнительной осадки штампа при нагрузке 0,25 МПа первых достигает 57,7...25,7 мм, что примерно в 1,5...6 раз превышает осадку штампа грунтов среднего Приднестровья и Центрально-Молдавской возвышенности.

Результаты анализа данных опытных нагрузок на штамп показывают, что больше напоминающие «истинно» просадочные лессовые грунты распространены в южной части региона. «Наименее лессовидный» облик характерен для грунтов Центрально-Молдавской возвышенности.

Анализ результатов опытных замачиваний котлованов по общепринятой методике и ускоренному методу (табл. 6) показывает, что для последнего метода требуются значительно меньшие материальные и временные затраты. Несмотря на то, что время замачивания сократилось в 5...6 раз, а общее количество залитой воды в котлован — в 114...117 раз, более густая сеть дренажных скважин способствует увеличению удельного расхода воды от 0,34...0,36 до 1,20...2,07 м³/м²-сут. В грунтовых условиях Кишинева это привело к лучшему промачиванию лессовой толщи. Степень влажности грунтов котлованов № 3 и 5, лессовая толща которых подстилается глиной, при замачивании ускоренным методом достигнута даже большая, чем по общепринятой методике, и составила 0,76...0,97 вместо 0,55...0,85. Аналогичная картина наблюдается и при замачивании котлованов № 1 и 2, лессовая толща которых подстилается песком. В этом случае степень влажности грунтов в конце замачивания составила 0,58...0,66 по сравнению с 0,53...0,63. Сопоставление же результатов осадки дна котлованов (табл. 7) показывает, что они достаточно близки между собой. В обоих случаях (микрорайоны Будешть и Ботаника) тип грунтовых условий толщи по результатам ускоренного замачивания и по обычной методике определен как первый.

Сопоставление результатов изучения просадочности по лабораторным и полевым методам. Данные, приведенные в табл. 6 и 7, позволяют проанализировать сходимость результатов определений просадочности путем замачивания опытных котлованов и по данным компрессионных испытаний методами «одной» и «двух кривых». Следует отметить лучшую сходимость результатов опытных замачиваний методом «одной кривой», значения корректировочного коэффициента составляют 0,15...0,85. Замачивание котлованов в микрорайонах Буюкань и Будешть параллельно по двум методикам дает возможность сопоставления результатов опытов, которые свидетельствуют о том, что для лессовых толщ города, состоящих из средних и тяжелых суглинков, обычная методика замачивания не дает представления о возможной просадке толщи. В этом случае более приемлема методика ускоренного замачивания.

Т а б л и ц а 6

Характеристика опытных котлованов

Показатель	Номер котлована					
	1	2	3	4	5	6
Площадь котлована, м ²	598	5	5	5	400	600
Продолжительность замачивания, сут	78	14	13	10	81	193
Общее количество залитой воды, м ³	17 000	145	78	80	11 200	—
Расход воды на единицу площади дна котлована, м ³ /м ²	28,4	29,0	15,6	16,0	28,0	—
Удельный расход воды на единицу площади дна котлована м ³ /м ² сут	0,36	2,07	1,20	1,60	0,34	—
Количество дренажных скважин на 1 м ² площади дна котлована, скв./м ²	0,06	0,29	0,29	0,29	0,05	0,05
Глубина установившегося уровня грунтовых вод в конце замачивания, м	Горизонт не образовался	Горизонт не образовался	15,0	—	11,0...12,5	11,8
Литологический тип подстилающих лессовую толщу	Песок	Песок	Глина	Водонасыщенный песок	Глина	Глина

Т а б л и ц а 7

Сравнительная характеристика результатов опытных замачиваний котлованов в лессовых грунтах Кишинева

Номер котлована	Методика замачивания	Тип лессовых грунтов	Мощность просадочной толщи, м	Фактическая осадка дна котлована S _ф , мм	Просадка толщи по результатам компрессионных испытаний, мм		Корректировочные коэффициенты	
					по одной кривой S _к ¹	по двум кривым S _к ²	$\frac{S_{\phi}}{S_k^1}$	$\frac{S_{\phi}}{S_k^2}$
1	Общепринятая	Супеси и легкие суглинки Q ₂₋₄	14,5	4	29	56	0,15	0,07
2	Ускоренная	—	—	23	—	—	0,72	0,41

Окончание табл. 7

Но- мер кот- ло- вана	Методи- ка зама- чивания	Тип лессо- вых грун- тов	Мощность просадоч- ной тол- щи, м	Фактиче- ская осад- ка дна котлована S_{ϕ} , мм	Просадка толщи по ре- зультатам компресси- онных испы- таний, мм		Корректи- ровочные коэффици- енты	
					по од- ной кри- вой S_k^1	по двум кри- вым S_k^2	$\frac{S_{\phi}}{S_k^1}$	$\frac{S_{\phi}}{S_k^2}$
5	Обще- принятая	Сред- ние суг- линки Q_{2-4}	13,0	0	28	60	—	—
3	Уско- ренная	—	—	24	—	—	0,85	0,40

Определенный интерес для изучения лессовых грунтов региона представляют сведения о совпадении результатов изучения просадочности статическими нагрузками на штамп и лабораторных исследований. Имеющиеся в нашем распоряжении данные позволяют сделать выводы по этому вопросу для четырех основных районов междуречья: среднее Приднестровье (Рыбница), среднее Припрутье (Унгень), Центрально-Молдавская возвышенность (Кишинев), южное Приднестровье (Бендер). Вследствие того, что штамповые испытания выполнялись на глубине 4...6 м, в пределах указанного слоя рассчитаны физические характеристики и начальное просадочное давление для грунтов двух инженерно-геологических элементов: супеси и легкие суглинки; средние и тяжелые суглинки (табл. 8).

Анализ данных табл. 8 показывает, что для всех типов лессовых грунтов лабораторные данные по просадочности превышают значения, полученные в полевых условиях. Значения корректировочного коэффициента составляют 0,67...0,91 и увеличиваются с уменьшением глинистости, что соответствует литературным данным для других регионов юга Русской платформы.

Соотношение между относительной просадочностью лессовых грунтов, определенной путем статических нагрузок на стандартный штамп, и относительной просадочностью, полученной в лабораторных условиях при нагрузке 0,3 МПа, изучалось для двух отложений: супеси и суглинки южного Приднестровья (Бендер) и Центрально-Молдавской возвышенности (Кишинев) и средние суглинки среднего Приднестровья (Рыбница). Получены следующие уравнения регрессии.

Супеси и легкие суглинки южного Приднестровья: $\xi_{st\ ш}^{0,3} = 0,7518$,
 $\xi_{st\ л}^{0,3} = 0,0013$; $r = 0,93$.

Средние суглинки среднего Приднестровья: $\xi_{st\ ш}^{0,3} = 0,9778$, $\xi_{st\ л}^{0,3} = 0,0186$;
 $r = 0,91$.

Таблица 8

Сравнительная характеристика значений начального просадочного давления по компрессионным испытаниям и статическим нагрузкам на шпалы

Литологический тип	Индекс	Физическая характеристика			Начальное просадочное давление, МПа		
		W	J_p	$n, \%$	по лабораторным данным, $P_{н.д.}$	по штамповым исследованиям, $P_{н.ш.}$	$\frac{P_{н.д.}}{P_{н.ш.}}$
Рыбница, среднее Приднестровье							
Супеси и легкие суглинки	$d Q_{3-4}$	$\frac{0,14}{43; 0,030}$	$\frac{0,08}{47; 0,019}$	$\frac{48,0}{44; 3,00}$	$\frac{0,10}{43; 0,055}$	$\frac{0,11}{6; 0,076}$	0,91
Средние и тяжелые суглинки	$d Q_{3-4}$	$\frac{0,18}{33; 0,23}$	$\frac{0,12}{36; 0,009}$	$\frac{49,0}{36; 5,58}$	$\frac{0,12}{31; 0,050}$	$\frac{0,17(1)}{5; 0,12}$	0,71
Кишинев, Центральное-Молдавская возвышенность							
Супеси и легкие суглинки	$ed(p) Q_{3-4}$	$\frac{0,11}{71; 0,030}$	$\frac{0,08}{88; 0,019}$	$\frac{45,6}{86; 2,40}$	$\frac{0,08}{77; 0,006}$	$\frac{0,09}{10; 0,008}$	0,87
Средние и тяжелые суглинки	$ed(p) dQ_{3-4}$	$\frac{0,15}{76; 0,024}$	$\frac{0,12}{77; 0,014}$	$\frac{46,5}{70; 3,40}$	$\frac{0,14}{75; 0,005}$	$\frac{0,19(3)}{22; 0,013}$	0,73
Унгень, среднее Припрутье							
Супеси и легкие суглинки	$d Q_{3-4}$	$\frac{0,15}{36; 0,030}$	$\frac{0,08}{36; 0,019}$	$\frac{48,0}{37; 2,48}$	$\frac{0,13}{34; 0,043}$	$\frac{0,22}{4}$	0,58
Бендер, южное Приднестровье							
Супеси и легкие суглинки	$d (eol) Q_{3-4}$	$\frac{0,12}{18; 0,046}$	$\frac{11}{18; 0,077}$	$\frac{45,3}{18; 3,30}$	$\frac{0,08}{14; 0,019}$	$\frac{0,12}{5}$	0,64

Примечание. В числителе — среднее значение; в скобках — количество опытов, не показавших просадочных свойств; в знаменателе — количество определений и стандартное отклонение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инструкция по уплотнению просадочных грунтов предварительным замачиванием. М.: Стройиздат, 1965. 23 с.
2. *Мавлянов Г. А., Пулатов К. П.* Методы изучения просадочности лессовых пород с целью ирригационного освоения целинных земель. Ташкент, 1975. 80 с.
3. *Крутов В. И., Попсуенко Н. К.* Ускоренный метод определения просадочности лессовых грунтов замачиванием котлованов небольшой площади // Инженерная геология. 1981. № 3. С. 108—116.
4. *Олянский Ю. И.* Лессовые грунты юго-западного Причерноморья (в пределах республики Молдова). Кишинев, 1992. 130 с.
5. Рекомендации по испытаниям просадочных грунтов статическими нагрузками. М.: Стройиздат, 1974. 17 с.

© Богомолов А. Н., Скибин Г. М., Олянский Ю. И., Махова С. И., Алексеев А. Ф., Галай Б. Ф., 2015

Поступила в редакцию
в мае 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Оценка просадочности лессовых оснований полевыми и лабораторными методами / А. Н. Богомолов, Г. М. Скибин, Ю. И. Олянский, С. И. Махова, А. Ф. Алексеев, Б. Ф. Галай // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 40(59). С. 98—115.

Об авторах:

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

Скибин Геннадий Михайлович — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой оснований и фундаментов, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова (ЮРГПУ(НПИ)). Российская Федерация, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

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

Махова Светлана Ивановна — канд. геол.-минерал. наук, доцент, доцент кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Алексеев Алексей Федорович — канд. геол.-минерал. наук, доц., доц. кафедры инженерной геологии и геоэкологии, Уральский государственный горный университет. Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, alekseev_af@mail.ru

Галай Борис Федорович — д-р геол.-минерал. наук, проф., проф. кафедры строительства, Северо-Кавказский федеральный университет. Российская Федерация, 355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, galaybf@mail.ru

**A. N. Bogomolov, G. M. Skibin, Yu. I. Olyanskii, S. I. Makhova,
A. F. Alekseev, B. F. Galai**

**ASSESSMENT OF SUBSIDENCE OF LOESS FOUNDATIONS
BY FIELD AND LABORATORY METHODS**

On the example of loess strata in Moldova the comparative assessment of different field and laboratory methods for the determination of the initial subsidence pressure of loess rocks and the amount of subsidence of loess strata due to its own weight when soaking is provided.

Key words: loess rocks, value of relative subsidence, initial subsidence pressure, subsidence of loess strata.

REFERENCES

1. *Instruktsiya po uplotneniyu prosadochnykh gruntov predvaritel'nym zamachivaniem* [Instructions for compaction of subsiding soil by presoaking]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1965. 23 p.
2. Mavlyanov G. A., Pulatov K. P. *Metody izucheniya prosadochnosti lessovykh porod s tsel'yu irrigatsionnogo osvoeniya tselinnykh zemel'* [Methods of studying the subsidence of loess rocks with the aim of irrigation development of virgin lands]. Tashkent, 1975. 80 p.
3. Krutov V. I., Popsuenko N. K. *Uskorenniy metod opredeleniya prosadochnosti lessovykh gruntov zamachivaniem kotlovanov nebol'shoi ploshchadi* [Rapid method for determination of subsidence of loess soils by soaking of pits in small area]. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering Geology], 1981, no. 3, pp. 108—116.
4. Olyanskii Yu. I. *Lessovye grunty yugo-zapadnogo Prichernomor'ya (v predelakh respublik Moldova)* [Loess soils in the south-west Black Sea region (within the Republic of Moldova)]. Kishinev, 1992. 130 p.
5. *Rekomendatsii po ispytaniyam prosadochnykh gruntov staticheskimi nagruzkami* [Recommendation on testing soil subsidence by static loads]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1974. 17 p.

For citation:

Bogomolov A. N., Skibin G. M., Olyanskii Yu. I., Makhova S. I., Alekseev A. F., Galai B. F. [Assessment of subsidence of loess foundations by field and laboratory methods]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 40(59), pp. 98—115.

About authors:

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

Skibin Gennadii Mikhailovich — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Bases and Foundations Department, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI). 132, Prosvetshchaniya St., Novocheerkassk, 346428, Russian Federation

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

Makhova Svetlana Ivanovna — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Docent, Docent of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

Alekseev Aleksei Fedorovich — Candidate of Geological and Mineral Science, Docent, Docent of Engineering Geology and Geo-ecology Department, Ural State Mining University. 30, Kuibyshev St., Ekaterinburg, Russian Federation, alekseev_af@mail.ru

Galai Boris Fedorovich — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Professor of Construction Department, North Caucasian Federal University. 1, Pushkin St., Stavropol', 355009, Russian Federation, galaybf@mail.ru

УДК 624.139.1

А. Б. Пономарев, Д. Г. Золотозубов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

УЛУЧШЕНИЕ СВОЙСТВ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ НА КАРСТООПАСНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ С ПОМОЩЬЮ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Армирование грунтовых оснований с помощью геосинтетических материалов является одним из возможных решений обеспечения конструкционной безопасности зданий на карстоопасных территориях. Для проектирования армогрунтовых оснований необходимо учитывать такие факторы, как диаметр карстового провала, характеристики грунтов основания, прочностные характеристики геосинтетического материала и глубина его заложения.

К л ю ч е в ы е с л о в а: карст, провалы, геосинтетика, армирование грунтов, методы расчета.

Актуальность. На территории Пермского края, как и достаточно большой части других регионов России, возможны провалы грунтовых масс и земной поверхности, которые происходят в результате как карстовых проявлений, так и по техногенным причинам. Такие провалы очень часто приводят к образованию аварийных ситуаций, например повреждению коммуникаций или провалам городских дорог (рис. 1), частичному или полному разрушению зданий и сооружений или приостановке их эксплуатации и т. п.



Рис. 1. Провал дорожного полотна

При строительстве зданий и сооружений, автомобильных дорог на таких территориях необходимо предусмотреть конструктивные защитные мероприятия, обеспечивающие безопасность сооружений.

Выбор защитных мероприятий. При строительстве на карстоопасных территориях предусматривают различные защитные мероприятия. При строительстве зданий повышенной ответственности, а также при обнаружении при геологических изысканиях на месте строительства значитель-

ных карстовых полостей лучшим способом защиты будет перенос места строительства, но это не всегда возможно, в том числе из-за недостатка территории.

Для выбора наиболее оптимальных защитных мероприятий необходимо установить точное местонахождение и другие характеристики уже имеющихся пустот. Для этого используют полевые методы исследований, например георадары, контрольное бурение или зондирование, или изучают архивные документы. Но при этом нужно учитывать, что, например, применение георадаров ограничено по глубине, а архивные материалы зачастую отсутствуют или представлены не в полном объеме. Следовательно, на карстоопасных территориях необходимо проводить более тщательные и объемные инженерно-геологические и инженерно-гидрологические изыскания.

Вид защитных мероприятий выбирается из сравнения различных вариантов и применительно к конкретным природным и строительно-эксплуатационным условиям. Их технико-экономическую эффективность рассчитывают с учетом стоимости необходимых дополнительных изысканий, стоимости самих мероприятий, а также с учетом возможных экономических потерь при возникновении аварийной ситуации, приводящей или к остановке эксплуатации, или к разрушению сооружения.

При строительстве зданий и сооружений на карстоопасных территориях предусматривают различные конструктивные решения, выбор которых во многом зависит от размеров (глубины и ширины) возможного карстового провала. Наибольший выбор методов защиты существует для зданий нормального и пониженного уровней ответственности.

По статистике на территории России чаще всего образуются провалы диаметром до 10 м. В этих случаях при строительстве зданий повышенного и нормального уровней ответственности наиболее целесообразно предусматривать конструктивные мероприятия, связанные с увеличением жесткости или податливости зданий и сооружений, устройством в подземной части коробчатых фундаментов, плоских или ребристых плит, перекрестных ленточных фундаментов. Как правило, фундаменты изготавливают из монолитного железобетона, но при техническом обосновании возможно применение сборных ленточных фундаментов с монолитными железобетонными поясами.

При строительстве автомобильных дорог, городских улиц и сооружений нормального и пониженного уровня ответственности можно использовать менее дорогостоящее решение, а именно устройство основания сооружений из армированного грунта [1]. Применение геосинтетических материалов при соблюдении определенных условий позволяет обеспечить необходимый уровень защиты для предотвращения развития аварийных ситуаций. При этом необходимо учитывать, что, как показали исследования, проведенные авторами, наиболее эффективно использование геосинтетических материалов при диаметрах провалов до 2,0 м [2].

Армирование оснований. Армирование грунтовых оснований геосинтетическими материалами получило достаточно широкое распространение, во многом благодаря достаточно большому выбору геосинтетиков. Грунт, улучшенный с помощью геосинтетических материалов, за счет проявления армирующего эффекта способен уменьшать нормальные напряжения в грунтовом основании и снижать до нормативных значений деформации основа-

ния и, следовательно, надземных конструкций. В этом случае армированное геосинтетическими материалами грунтовое основание приобретает механические характеристики, делающие его пригодным для возведения и эксплуатации различных инженерных сооружений, в том числе и на карстоопасных территориях.

Для армирования грунтовых оснований в настоящее время используются различные геосинтетические материалы, различающиеся как по материалу, из которого они изготовлены, так и по своей структуре. Соответственно, различаются и механические свойства этих материалов.

Ранее проведенные авторами исследования показали, что эффективное применение геосинтетических материалов для армирования оснований на территориях с возможными провалами напрямую зависит от диаметра предполагаемого провала, прочности на разрыв геосинтетики и глубины ее заложения [3].

Проблемы, возникающие при армировании оснований. Для принятия решения о проектировании оснований сооружений на карстоопасных территориях с применением геосинтетического материала в качестве армирующего элемента необходимо количественно и качественно оценить следующие параметры:

наиболее вероятный диаметр провала земной поверхности, который можно установить только на основе многолетних наблюдений;

допустимая величина оседания земной поверхности на месте строительства, которая во многом зависит от категории возводимого сооружения;

нагрузка на основание от сооружения;

прочность на разрыв геосинтетического материала, используемого для армирования основания, а также из какого материала он изготовлен и какую имеет структуру;

глубина заложения армирующего слоя.

Очевидно, что последние две позиции полностью зависят от первых трех.

Для улучшения свойств грунтов, если не учитывать возникновения провалов, наибольший эффект достигается при расположении армирующего слоя ближе к дневной поверхности земли [4]. При учете возможного провала картина существенно меняется, что подтверждается проведенными ранее зарубежными исследованиями [5, 6]. Расположение армирующей прослойки на значительной глубине позволяет перераспределить напряжения в грунтовом массиве выше армирующего слоя и снизить деформации земной поверхности, что связано с возникновением так называемого «арочного эффекта» [7]. Подтверждением этому являются в том числе и результаты модельных экспериментов, выполненных в свое время одним из авторов настоящей статьи совместно с иностранными коллегами [2].

Модельный эксперимент. Во время эксперимента исследовалось поведение грунтового основания и дорожного полотна автомобильной дороги при однослойном армировании. Моделировалась нагрузка от движения автомобиля со скоростью 60 км/ч при максимальной нагрузке на одно колесо 75 кН. Нагрузки прикладывались с помощью гидроцилиндров до и после образования провала. Количество циклов соответствовало длительным динамическим нагрузкам на автодорогу. Эксперимент был основан на соблюдении приме-

няемого в Германии принципа частичной безопасности, допускающего ограниченные осадки дневной поверхности основания сооружения.

Основные выводы, сделанные по результатам эксперимента, связаны с тем, что использование геосинтетического материала в качестве армирующего элемента привело к перераспределению напряжений в грунтовом массиве (рис. 2) и тем, что в процессе проведения эксперимента на первоначальном этапе наблюдалось образование несущего свода (арочный эффект) (рис. 3), благодаря которому осадка грунтовой поверхности в этот период была значительно меньше, чем глубина провала внутри грунтового массива.

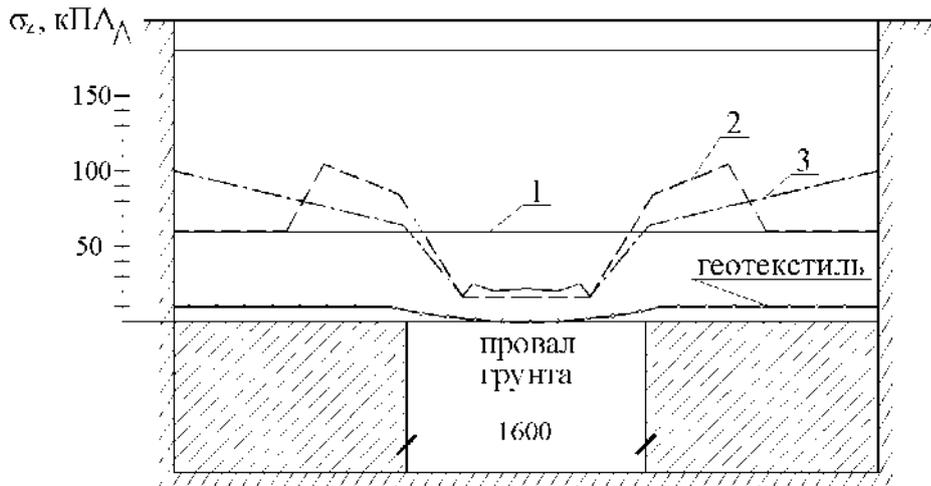


Рис. 2. Изменение вертикальных напряжений на контакте геотекстиля и грунта: 1 — до начала эксперимента; 2 — после обвала земли в начале динамических испытаний; 3 — в конце эксперимента

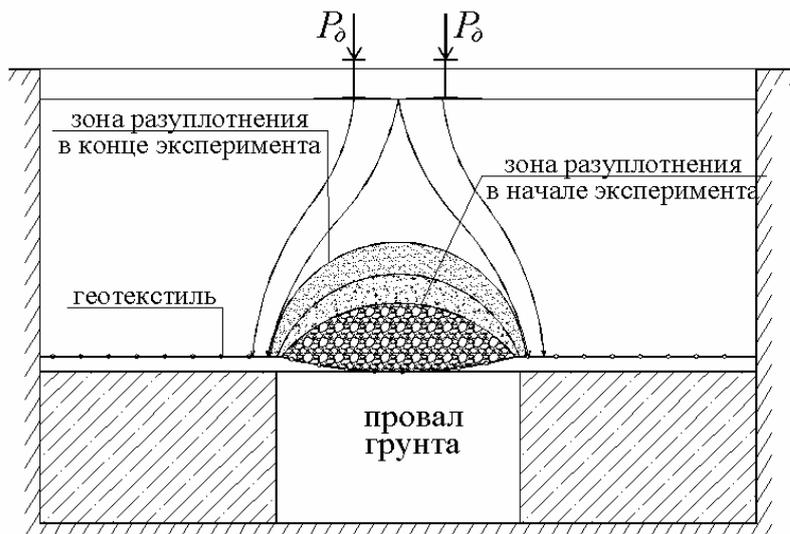


Рис. 3. Схема изменения конфигурации несущего (арочного) свода над зоной разуплотнения

Для оценки реальной работы армированного грунтового основания в широком диапазоне инженерно-геологических условий Пермского края в дальнейшем были проведены численные эксперименты с использованием программного комплекса PLAXIS 2D [2].

Численное моделирование работы армированного основания при возникновении провала. Численное моделирование было разделено на два основных этапа:

моделирование лабораторного эксперимента;

моделирование наиболее типичных грунтовых условий Пермского края.

Сравнение результатов численного и лабораторного экспериментов показало значительное расхождение количественных значений. Это связано с тем, что невозможно точно смоделировать в двухмерной численной задаче трехмерный модельный эксперимент и сложно смоделировать длительное (около 300 000 циклов) динамическое нагружение — поэтому количество циклов нагружения при проведении расчетов в программном комплексе PLAXIS 2D было ограничено. При этом необходимо отметить, что качественная картина деформирования грунтового массива в обоих случаях была схожа.

На следующем этапе были изменены характеристики грунтов на наиболее типичные для карстоопасных районов Пермского края. Схема использовалась такая же, как и в предыдущих расчетах.

При анализе результатов численного эксперимента было установлено, что в грунтовом массиве при наличии армирующего элемента имеют место эффекты, похожие на те, что наблюдались при модельных экспериментах, например образование несущего свода (арочный эффект) — рис. 4.

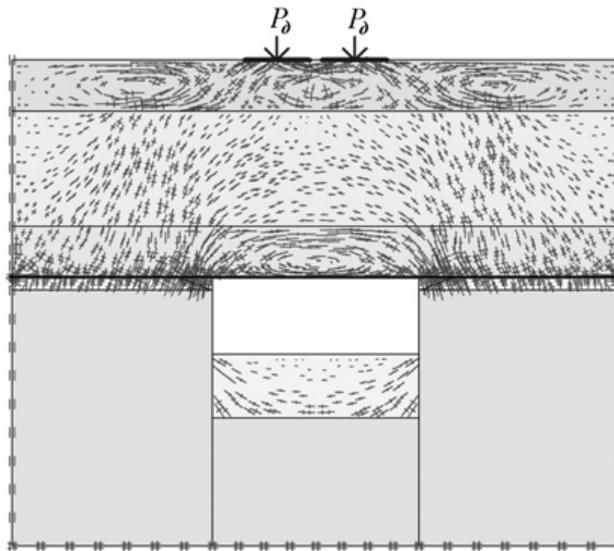


Рис. 4. Деформации грунтового массива при численных расчетах

В дальнейшем моделировались и другие грунтовые условия. Также были проведены численные эксперименты, которые были нацелены на определение оптимальной глубины заложения армирующей прослойки [3].

Прочность на разрыв геосинтетического материала. Прочность геосинтетического материала на разрыв является важнейшей характеристикой для снижения деформативности оснований при их армировании при возникновении провалов.

Ранее проведенные исследования [2, 8] показывают, что увеличение жесткости армирующей прослойки приводит не только к увеличению разрывного усилия, но и к снижению деформаций земной поверхности выше ее. Связано это с меньшим растяжением геосинтетического материала. Кроме того, более прочный материал позволяет обеспечить большую безопасность при возникновении провала. Это связано с более длительным развитием во времени деформаций армированного грунтового массива по сравнению с практически мгновенными провалами при отсутствии армирующих элементов.

Необходимо отметить, что при аналитических и численных расчетах обычно учитывают только линейно-упругую составляющую графика зависимости относительного удлинения геосинтетического материала от растягивающего усилия (рис. 5).

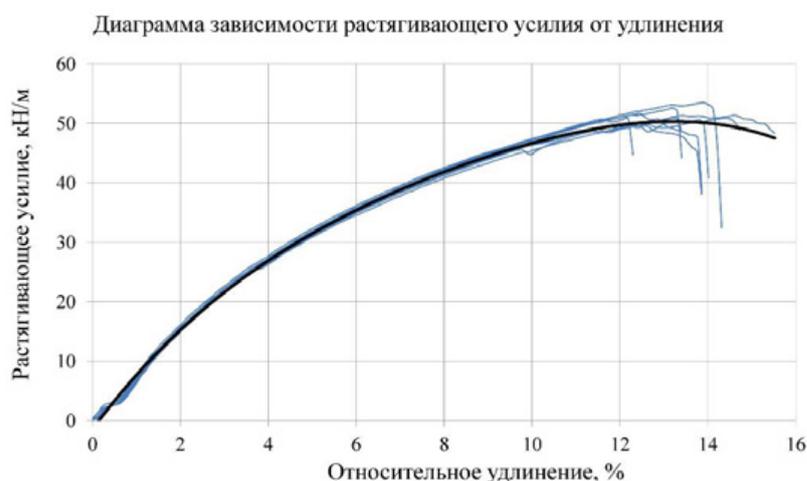


Рис. 5. Зависимость деформации от нагрузки (на примере георешетки «Апролат СД30-400»)

Однако, по нашему мнению, с точки зрения оценки развития аварийной ситуации необходимо учитывать и нелинейную часть этой зависимости. В настоящее время исследования в этом направлении продолжаются.

Глубина заложения армирующей прослойки. Недостатком определения оптимальной глубины заложения армирующей прослойки с помощью расчетов в программном комплексе является то, что очень сложно достоверно смоделировать образование полости внутри грунтового массива.

При проведении модельного эксперимента глубина заложения армирующей прослойки составляла 1,7 м при диаметре провала 1,6 м. Наши численные эксперименты для грунтовых условий Пермского края показали, что глубина заложения должна быть не менее 1,0 м для диаметра провала 2,0 м [3]. Однако вопрос расчета оптимальной глубины заложения армирующего элемента в настоящее время остается открытым.

В месте возникновения провала при большей глубине заложения армирующего элемента уменьшаются деформации земной поверхности, что в большинстве случаев и является решающим фактором. Но необходимо учитывать, что при этом возрастают затраты на устройство армированного основания сооружения в связи с большим объемом земляных работ. Следовательно, чем точнее мы определим оптимальную глубину заложения, тем эффективнее будет работать основание.

Расчет глубины заложения. На расчет глубины заложения армирующего элемента будут влиять следующие факторы:

- предполагаемый диаметр провала;
- характеристики грунта основания, устраиваемого выше армирующей прослойки;
- нагрузка на основание на уровне дневной поверхности;
- прочность геосинтетического материала на разрыв.

Первый подход, расчет с помощью программного комплекса PLAXIS, может быть достаточно эффективным при введении определенных допущений и следующих условиях:

- задается неизменный диаметр провала;
- устанавливается первоначальная глубина заложения армирующего элемента (например, 1,0 м);
- грунт непосредственно ниже армирующего элемента принимается без возможности бокового расширения (без этого условия расчеты просто невозможно провести).

Существуют и другие варианты моделирования карстового провала в грунтовом массиве, однако мы вынесем их за рамки этой статьи, так как это тема отдельных исследований.

Между элементом, моделирующим армирующую прослойку, и грунтом обязательно вводится интерфейсный элемент для учета коэффициента трения между геосинтетическим материалом и грунтом, так как он влияет на напряженно-деформированное состояние грунтового массива. Этот коэффициент на практике определяется экспериментально [9], и за рубежом такие эксперименты обязательны.

Далее рассмотрим краткий алгоритм выполненных расчетов.

Сначала прилагается поверхностная нагрузка, затем в грунте ниже армирующего элемента деактивируются кластеры для моделирования провала необходимого размера. Оценивается напряженно-деформированное состояние выше армирующей прослойки. При необходимости изменяют характеристики геосинтетического материала, грунта выше армирующего элемента, величину слоя засыпки.

Проведя серию таких расчетов, можно подобрать наиболее оптимальные значения всех вышеперечисленных характеристик. Основным критерием выбора будет наименьшее значение осадки поверхности грунтового массива.

- Второй подход заключается в использовании аналитических методов:
- методики, указанной в Британском стандарте BS 8006, раздел 8.4 (BSI, 1995) [10];
 - метода Giroud [11];
 - метода Perrier [12];
 - R.A.F.A.E.L.-метода [13];
 - методики, разработанной авторами статьи [14].

Во всех этих методах глубина заложения определяется методом подбора, критерием выбора будет минимальная осадка дневной поверхности.

Третий вариант расчета учитывает возникновение арочного эффекта и его можно рекомендовать только при наличии выше карстовой полости связанных грунтов. В этом случае минимальная глубина заложения армирующей прослойки должна быть определена как величина стрелы подъема арки. При рассмотрении плоской задачи можно воспользоваться решением, предложенным Л. К. Гинзбургом [15] для определения стрелы подъема арки (рис. 6) при определении критического расстояния между удерживающими элементами для слоя толщиной 1 м:

$$f = \frac{q_v \pm \sqrt{q_v^2 - 2q_v \operatorname{ctg} \varphi}}{4c} b, \quad (1)$$

где q_v — поверхностная нагрузка, кН/м; c — удельное сцепление грунта, кПа; φ — угол внутреннего трения, град.; b — ширина провала.

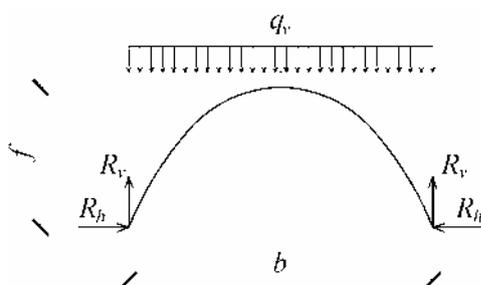


Рис. 6. Схема к определению стрелы подъема арки

В качестве подтверждения применимости этой формулы можно привести следующий пример, основанный на результатах модельного эксперимента в Германии.

Диаметр моделируемого провала составил 1,6 м, глубина заложения от дневной поверхности — 1,7 м, из которых верхние 0,2 м — это асфальт. Приведенные характеристики грунта засыпки (песчано-гравийная смесь с примесями глины), необходимые для расчета: $c = 16$ кПа, $\varphi = 42$ град. При нагрузке над провалом, равной 75 кН, распределенная нагрузка составит $q_v = 37,3$ кПа. Подставив эти значения в формулу (1), получим значение стрелы прогиба 1,4 м. То есть слой грунта над армирующим элементом, равный 1,5 м, как раз оказался достаточным, чтобы при испытаниях возник арочный эффект.

Решение трехмерной задачи для определения стрелы прогиба арки пока не рассматривалось, так как требует сопоставления с большим количеством экспериментов.

Проведенные авторами исследования показывают, что улучшение свойств грунтового основания при использовании геосинтетических материалов в качестве горизонтальных армирующих элементов при устройстве оснований и фундаментов на карстоопасных территориях приводит к значительному снижению деформативности грунтовых оснований при возникновении провалов грунта, что положительно влияет на конструкционную безопасность зданий и сооружений.

Введение армирующего элемента в местах обрушения грунтов перераспределяет напряжения в основании, выравнивает осадки и тем самым снижает негативные последствия обрушения грунтов. А это значит, что при правильном учете таких параметров, как диаметр провала, характеристики грунтов основания, прочностные характеристики армирующих элементов, можно запроектировать армированное основание, которое позволяет избежать катастрофических последствий при возникновении карстовых провалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. The use of synthetic materials in the highway engineering in the Urals / A. A. Bartolomey, V. I. Kleveko, V. G. Ofrikhter, A. B. Ponomaryov, A. N. Bogomolov // Proceedings of the twelfth European conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Amsterdam, Netherlands, 1999. Vol. 2. Pp. 1197—1202.
2. Золотозубов Д. Г., Пономарев А. Б. Обеспечение конструкционной безопасности грунтовых оснований при возникновении провалов на карстовых территориях // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2009. № 15 (34). С. 15—18.
3. Пономарев А. Б., Золотозубов Д. Г. Влияние глубины заложения армирующего материала на несущую способность основания при провалах грунта // Вестник гражданских инженеров. 2010. № 2 (23). С. 98—104.
4. Клевеко В. И. Исследование работы армированных глинистых оснований // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2014. № 4. С. 101—110.
5. Paul A., Schwerdt S. Untersuchungen zur Ueberbrueckung von Tagesbruechen und Erdfaellen durch Einbau einer Einlagigen Geokunststoffbewehrung // 7. Tagung ueber «Kunststoffe in der Geotechnik», Muenchen. 2001. Pp. 95—105.
6. Schwerdt S. Die Ueberbrueckung von Erdeinbruechen unter Verwendung von einlagig verlegten Geogittern — Vergleich zwischen Versuchsergebnissen und den Ergebnissen von analytischen und numerischen Berechnungen // Geotechnik. 2003. № 26. Pp. 95—105.
7. Schwerdt S., Naciri O., Jenner C. G. Performance of aggregates in geogrid-reinforced soils used for protection against surface collapse into underground voids // EuroGeo 3: Geosynthetics conference. Munich, Germany, 2004. Pp. 483—488.
8. Овчаров А. С., Золотозубов Д. Г. Определения прочностных характеристик геосинтетических материалов // Вестник Пермского государственного технического университета. Строительство и архитектура. 2011. № 1. С. 54—58.
9. Определение характеристик трения путем проведения испытаний на сдвиг для двух типов геосинтетических материалов / Д. А. Татьянников, А. Б. Пономарев, В. И. Клевеко, S.-H. Schlömp, S. Schwerdt // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2014. № 1. С. 64—88.
10. BS 8006: Code of Practice for Strengthened / Reinforced soil and Other Fill, British Standard Institution. Section 8. Design of embankment with reinforced soil foundation on poor ground. 1995. Pp. 98—121.
11. Giroud J. P., Bonaparte R., Beech J. F. Design of Soil Layer — Geosynthetic Systems overlying Voids // Geotextiles and Geomembranes. 1990. № 1. Pp. 11—50.
12. Pappiau Ch., Baraize E., Perrier H. Motorway level fortification above carstic cavities // Geotextiles-Geomembranes rencontres. 1995. Vol. 1. Pp. 93—99.
13. Blivet et. al. Design method for geosynthetics as reinforcement for embankment subjected to localized subsidence // Delmas; Gourc; Girard (ed): Geosynthetics 7. ICG, Swets & Zeitlinger. 2002.
14. Ponomaryov A., Zolotoubov D. Several approaches for the design of reinforced bases on karst areas // Geotextiles and Geomembranes. 2014. № 42. Pp. 48—51.
15. Гинзбург Л. К. Противооползневые удерживающие конструкции. М.: Стройиздат, 1979. 80 с.

© Пономарев А. Б., Золотозубов Д. Г., 2015

Поступила в редакцию
в мае 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Пономарев А. Б., Золотозубов Д. Г. Улучшение свойств грунтовых оснований на карстоопасных территориях с помощью геосинтетических материалов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 40(59). С. 116—126.

Об авторах:

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

Золотозубов Дмитрий Геннадьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр. 29, spsf@pstu.ru

A. B. Ponomarev, D. G. Zolotozubov

IMPROVEMENT OF PROPERTIES OF SOIL FOUNDATIONS IN KARST DANGEROUS TERRITORIES BY MEANS OF GEOSYNTHETIC MATERIALS

Reinforcing of soil foundations by means of geosynthetic materials is one of the possible solutions of ensuring constructional safety of buildings in the karst dangerous territories. For the design of reinforced ground foundations it is necessary to take into account such factors as diameter of karst failure, characteristics of soil foundations, strength characteristics of geosynthetic material and its laying depth.

Key words: karst, failures, geosynthetics, reinforcing of soils, calculation methods.

REFERENSES

1. Bartolomei A. A., Kleveko V. I., Ofrikhter V. G., Ponomaryov A. B., Bogomolov A. N. The use of synthetic materials in the highway engineering in the Urals. *Proceedings of the twelfth European conference on soil mechanics and geotechnical engineering*. Amsterdam, Netherlands, 1999, vol. 2, pp. 1197—1202.
2. Zolotozubov D. G., Ponomarev A. B. [Providing structural safety of soil foundation beds for gap origination in karst territories]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2009, no. 15(34), pp. 15—18.
3. Ponomarev A. B., Zolotozubov D. G. [Effect of the reinforcing material depth location on the bearing capacity of the foundation at ground downfall]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of civil engineers], 2010, no. 2 (23), pp. 98—104.
4. Kleveko V. I. [Research of the work of reinforced clay soils]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura* [PNRPU Bulletin. Construction and architecture], 2014, no. 4, pp. 101—110.
5. Paul A., Schwerdt S. Untersuchungen zur Ueberbrueckung von Tagesbruechen und Erdfaellen durch Einbau einer Einlagigen Geokunststoffbewehrung. *7. Tagung ueber «Kunststoffe in der Geotechnik»*, Muenchen. 2001. Pp. 95—105.
6. Schwerdt S. Die Ueberbrueckung von Erdeinbruechen unter Verwendung von einlagig verlegten Geogittern — Vergleich zwischen Versuchsergebnissen und den Ergebnissen von analytischen und numerischen Berechnungen. *Geotechnik*, 2003, no. 26, pp. 95—105.
7. Schwerdt S., Naciri O., Jenner C. G. Performance of aggregates in geogrid-reinforced soils used for protection against surface collapse into underground voids. *EuroGeo 3: Geosynthetic conference*. Munich, Germany. 2004. Pp. 483—488.
8. Ovcharov A. S., Zolotozubov D. G. [Testings of strength property of geosynthetic materials]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura* [PNRPU Bulletin. Construction and architecture], 2011, no. 1, pp. 54—58.
9. Tat'yannikov D. A., Ponomarev A. B., Kleveko V. I., Schlömp S.-H., Schwerdt S. [Determination of friction characteristics with shear test for two types of geosynthetics]. *Vestnik Permskogo*

natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura [PNRPU Bulletin. Construction and architecture], 2014, no. 1, pp. 64—88.

10. BS 8006: *Code of Practice for Strengthened. Reinforced soil and Other Fill*, British Standard Institution. Section 8. Design of embankment with reinforced soil foundation on poor ground. 1995. Pp. 98—121.

11. Giroud J. P., Bonaparte R., Beech J. F. Design of Soil Layer — Geosynthetic Systems overlying Voids. *Geotextiles and Geomembranes*, 1990, no. 1, pp. 11—50.

12. Pappiau Ch., Baraize E., Perrier H. Motorway level fortification above carstic cavities. *Geotextiles-Geomembranes rencontres*, 1995, vol. 1, pp. 93—99.

13. Blivet et. al. Design method for geosynthetics as reinforcement for embankment subjected to localized subsidence. Delmas; Gourc; Girard (ed): *Geosynthetics 7. ICG, Swets & Zeitlinger*. 2002.

14. Ponomaryov A., Zolotozubov D. Several approaches for the design of reinforced bases on karst areas. *Geotextiles and Geomembranes*, 2014, no. 42, pp. 48—51.

15. Ginzburg L. K. *Protivoopolznye uderzhivayushchie konstruksii* [Landslide retaining structures]. Moscow, Stroizdat Publ., 1979. 80 c.

For citation:

Ponomarev A. B., Zolotozubov D. G. [Improvement of properties of soil foundations in karst dangerous territories by means of geosynthetic materials]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 40(59), pp. 116—126.

About authors:

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

Zolotozubov Dmitrii Gennad'evich — Candidate of Engineering Science, Docent of Construction Operations and Geotechnics Department, Perm National Research Polytechnic University. 29, Komsomolskii prospect, Perm', 614990, Russian Federation, spstf@pstu.ru.

УДК 666.96:669-027.33

Л. А. Алимова^а, Т. К. Акчурин^а, О. Ю. Пушкарская^б

^а *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

^а *Волжский институт строительства и технологий (ВИСТех) — филиал ВолгГАСУ*

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ДЕЙСТВИЯ КРЕМНЕЗЕМСОДЕРЖАЩЕЙ ДОБАВКИ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИИ В СОСТАВАХ БЕТОННЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Широкие возможности использования дисперсных и ультрадисперсных микронаполнителей техногенной природы в составах композиций позволяют создавать бетоны нового поколения с высокой прочностью, повышенной удобоукладываемостью и долговечностью. Введением в состав бетонных композиций дисперсных отходов производств ферросплавов, содержащих кремний, возможна реализация уникальных свойств микрокремнезема за счет его эффективного сочетания с портландцементом. Высокая удельная поверхность полученного продукта шлаковых отходов ферросплавного производства после измельчения в сочетании с аморфной структурой частиц SiO₂ обеспечивает их реакционную способность и структурообразующую значимость в составах цементного вяжущего. Воздействие шлаков производства ферросплавов на свойства бетона имеет в основном физический характер, а позднее — как физический, так и химический, что обеспечивает более плотную структуру бетона и 30%-й рост его прочности.

К л ю ч е в ы е с л о в а: дисперсное наполнение, шлаки металлургии, бетонные композиции.

Современная тенденция развития строительной отрасли в области создания бетонов нового поколения, обладающих высокой прочностью, повышенной удобоукладываемостью и долговечностью, обусловлена широкими возможностями использования дисперсных и ультрадисперсных микронаполнителей техногенной природы в составах композиций. Улучшение комплекса технически важных свойств бетонов введением в их состав ультрадисперсных отходов металлургических производств, содержащих кремний, позволяет значительно повысить прочность, коррозионную стойкость, стойкость к истиранию, водонепроницаемость, морозостойкость бетонных композиций, что в итоге приводит к росту долговечности изделий и конструкций. Уникальные свойства микрокремнезема делают его сочетание с портландцементом эффективным. В механизме взаимодействия кремнийсодержащих микронаполнителей с гидратирующими минералами цемента главная роль отводится диоксиду кремния аморфной модификации. Количество SiO₂ в металлургических отходах зависит от его содержания в сплавах, а гидравлическая активность находится в прямой зависимости от размера частиц и их удельной поверхности. Развитая поверхность дисперсных частиц кремнезема в сочетании с высокой поверхностной энергией обуславливают их высокую пуццолановую активность и, как следствие, улучшение эксплуатационных свойств строительных композиций. Область применения кремнеземистых добавок охватывает производства строительных композиций гидротехнического и энергетического назначения, высотное и подземное строительство; используется при строительстве дорог, возведении зданий и сооружений ядерных установок и других уникальных объектов [1—6].

Производимый отечественными предприятиями микрокремнезем (МК) может быть отнесен к группе высокоэффективных добавок (SiO_2 до 90 %), что делает этот материал конкурентоспособным среди модифицирующих добавок импортного производства. Но нестабильность качества отрицательно влияет на активность МК, вынуждает использовать импортный продукт. Для России, где потенциальное производство кремнеземистых добавок, в том числе и техногенной природы, может покрыть требуемые объемы потребления, это абсурдно.

В этой связи научно-практический интерес представляют шлаки производства ферросплавов ЗАО «Камышинский литейно-ферросплавный завод» (ЗАО КЛФЗ). Исследование химического состава шлака производства ферросплавов ЗАО КЛФЗ проведено рентгеноспектральным анализом на спектрометре S4 PIONTEER. Химический состав шлака представлен оксидами кремния (SiO_2 — 70...75 %), алюминия (Al_2O_3 — 10...12 %), кальция (CaO — 8...9 %), магнезия (MgO — 1,5...2 %), общее содержание железа $\text{Fe}_{\text{общее}}$ составило до 9 %, доля оксида марганца и молибдена 0,2...0,5 %. Минералогический состав шлаков полностью зависит от условий производства и охлаждения расплава. При медленном охлаждении сначала выделяются сульфиды кальция и марганца. В дальнейшем ход кристаллизации расплава определяется химическим составом, исходной температурой и скоростью охлаждения. При равновесной кристаллизации конечными продуктами будут следующие фазы: ортосиликат кальция, ранкинит (C_3S_2), псевдоволластонит (CS), геленит (C_2AS), анортит (CAS_2) и тридимит. На практике равновесные условия не достигаются даже при медленном охлаждении. При резком охлаждении в шлаке содержится преимущественно стекловидная фаза, но и тогда в шлаках содержится определенное количество кристаллической фазы, которая представлена дендритными или точечными выделениями ольдгамита — CaS [5—7].

Существенное значение для гидравлической активности имеет удельная поверхность и гранулометрический состав, которые определяют водопотребность и расход добавки, модификаторов водоредуцирующего действия.

Для гранулометрического состава отходов МК характерна однородность частиц по размеру (средний диаметр частиц микрокремнезема ~0,03 мкм) для конденсированных аэрозолей. Материал такой дисперсности очень трудно транспортировать и хранить. Технологические попытки получить более удобный в обращении материал с помощью таких методов, как микрогранулирование путем длительной аэрации, механическое гранулирование и агломерация путем высушивания суспензий, позволили облегчить обращение с такими материалами, но рассеивание в бетонной смеси все же плохое, и необходимо использование пластифицирующих добавок.

Шлак производства ферросплавов (ШПФ) измельчался на лабораторной конусно-инерционной дробилке. Удельная поверхность измельченного материала определялась на приборе для измерения удельной поверхности дисперсных материалов ИУП-1 в соответствии с руководством по эксплуатации. В результате получен продукт микронаполнителя ШПФ с удельной поверхностью около $4500 \text{ см}^2/\text{гр}$.



Рис. 1. Шлак ЗАО КЛФЗ в куске

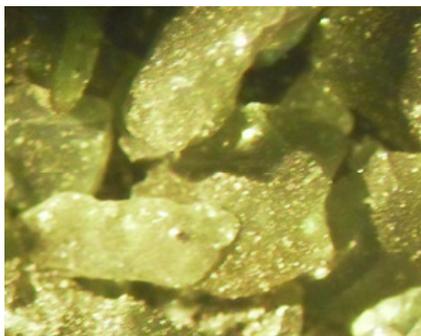


Рис. 2. Шлак ЗАО КЛФЗ после измельчения

Шлак производства ферросплавов (ШПФ) после измельчения использовался в составах мелкозернистых бетонных композиций в качестве кремнеземсодержащего микронаполнителя. Исследование материала проводилось методом оптической микроскопии при использовании стереоскопического микроскопа (МБС-10, 3,3-100,8^x), дающего прямое стереоскопическое изображение исследуемого образца. Цвет шлака в куске преимущественно серый, со светло-серым налетом, наблюдаются области высокой отражательной способности (рис. 1). Макроструктура измельченного шлака пористая, отмечается наличие закристаллизованной стекловидной составляющей (рис. 2).

Высокая удельная поверхность полученного продукта в сочетании с аморфной структурой частиц SiO_2 и оксидов алюминия, кальция, магния обеспечат ШПФ реакционную способность и структурообразующую значимость в составах цементного вяжущего. Снижение водопоотребности бетонной композиции достигается введением химических пластификаторов. Использовался суперпластификатор С-3. Дозирование ШПФ в составах композиций осуществляли из соображений участия кремнеземсодержащей добавки в процессах связывания гидроксида кальция микрокремнеземом при гидратации цемента, чтобы сохранить часть новообразований гидроксида кальция в структуре цементного камня. Активность ШПФ как сорбента по отношению к суперпластификатору С-3 неоднозначна и будет возрастать с увеличением его дисперсности, наличия окислов Al_2O_3 , CaO , MgO . Замена части цемента шлаковой добавкой приведет к естественному уменьшению в составе вяжущего минералов C_3A и C_3S , обладающих наибольшей адсорбционной способностью. Но адсорбция суперпластификатора будет увеличиваться по мере роста дозировок ШПФ, превышая теоретически предполагаемую, что объясняется увеличением количества образующихся высокодисперсных новообразований — гидросиликатов кальция, способствующих энергичному поглощению суперпластификатора из раствора. Для установления характера влияния кремнеземсодержащего микронаполнителя на изменение физико-механических свойств мелкозернистой композиции суперпластификатор вводили в дозировке, рекомендуемой производителем, что обусловлено формированием устойчивой реологической матрицы цементных систем и улучшением технологических свойств растворных и бетонных смесей [8—12].

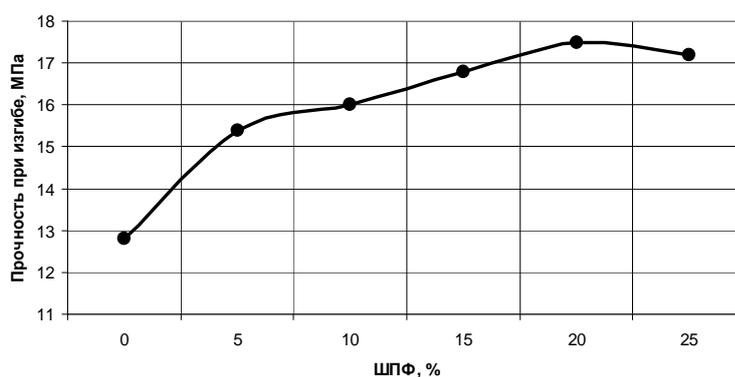


Рис. 3. Изменение прочности при изгибе в зависимости от содержания ШПФ

По результатам эксперимента установлено, что характер изменения прочности цемента с ШПФ связан со способностью добавки работать как микронаполнитель. При малых дозировках ШПФ ее частицы распределены в тесте, увеличивая однородность и прочность цементного камня. При максимальном содержании добавки в системе «цемент + ШПФ» прочность композиции повышается в среднем на 30 % (рис. 3—4). В этом случае частицы ШПФ расцениваются уже как элементы структуры цементного камня. Дальнейшее увеличение дисперсности материала ШПФ считаем нецелесообразным, так как это может привести к разбавлению цемента добавкой и нарушению непосредственных контактов между частицами цемента, что приведет к снижению прочности [13—14]. Тенденция роста плотности образцов, начиная с дозировки ШПФ 10 %, стабилизируется, общее увеличение плотности составило 17 % в сравнении с контрольным образцом (рис. 5).

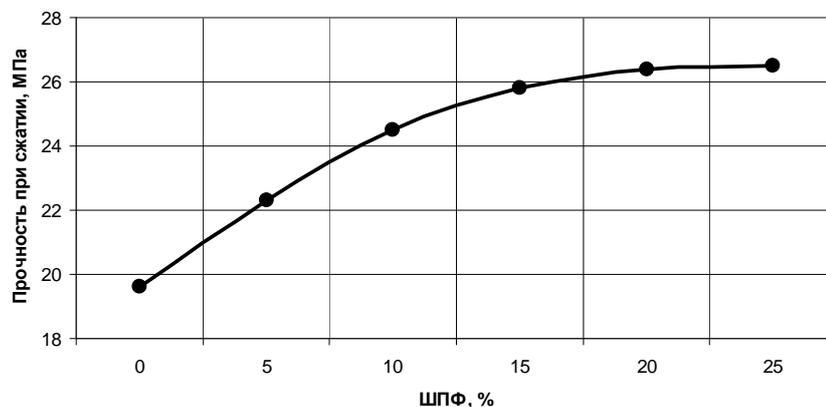


Рис. 4. Изменение прочности при сжатии в зависимости от содержания ШПФ

Положительное действие ШПФ объясняется значительным улучшением микроструктуры мелкозернистой композиции. Прочность контактной зоны возрастает с увеличением количества введенной кремнеземсодержащей добавки. Ее активность, влияющая на процессы гидратации, структурообразование и структуру затвердевшего цементного камня и бетона, обусловлена

наличием диоксида кремния аморфной модификации, определяется не только дисперсностью и формой частиц.

Основным фактором в механизме действия ШПФ является реакция взаимодействия диоксида кремния и гидроксида кальция с образованием низкоосновных гидросиликатов типа CSH (I) и соотношением CaO/SiO_2 от 0,9 до 1,3. Удельная поверхность зерен аморфного кремнезема в ШПФ, соизмеримая с удельной поверхностью цементного вяжущего, обуславливает позитивное влияние добавки на свойства бетона. Кремнезем в таком виде достаточно легко вступает в реакцию с гидроокисью кальция, высвобождаемой в процессе гидратации цемента, повышая тем самым количество гидратированных силикатов типа CSH. Эта вновь образовавшаяся фаза обладает способностью присоединять другие ионы, что имеет существенное значение для уменьшения расширения при использовании кремнеземосодержащей добавки, вызванного реакциями между щелочами и заполнителем. Переходная зона и является самым слабым звеном в обычном бетоне. Она содержит больше пустых пространств и сложностей, связанных с более плотной упаковкой частиц у поверхности. В этом пространстве скапливается больше частиц портландита. В бездобавочных образцах образуются крупные кристаллы $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ориентированные параллельно поверхности заполнителя. Кристаллы портландита обладают меньшей прочностью, чем гидратированные силикаты кальция CSH. Введение ШПФ в количестве 2...5 % приводит к уплотнению структуры переходной зоны за счет заполнения свободных пространств. Величина кристаллов портландита уменьшается вместе со степенью их ориентации относительно зерен заполнителя, что обуславливает упрочнение самой слабой зоны бетона [10—12]. В результате снижается пористость переходной зоны и повышается сцепление теста с заполнителем. Структурообразование является результатом химического воздействия, вызывает повышение прочности, плотности (рис. 5) и долговечности бетона.

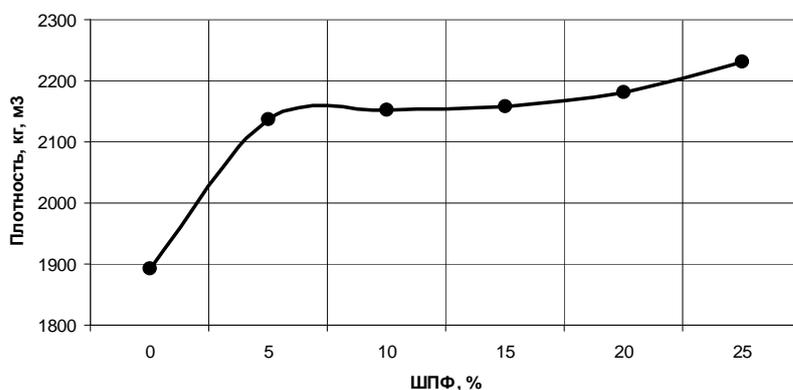


Рис. 5. Изменение плотности в зависимости от содержания ШПФ

Воздействие ШПФ на свойства бетона имеет в основном физический характер, а позднее как физический, так и химический. Изменение структуры порового пространства в бетоне рассматривается как главный фактор влияния кремнеземосодержащей добавки на механические свойства и прочность бетона.

Применение в технологии бетонов тонкодисперсных минеральных добавок шлака производства ферросплавов, сочетающих в себе высокую реологическую и химическую активность, открывает широкие возможности улучшения технологических свойств бетонных смесей и направленного воздействия на формирование структуры цементных материалов с целью получения высокопрочных бетонов с высокими показателями физико-механических свойств и долговечности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Туркина И. А. Необходимость и опыт использования отходов производства // Сб. докладов V Международного конгресса по управлению отходами и природоохранным технологиям «ВэйстТэк-2007». М., 2007.
2. Бальзанников М. И., Петров В. П. Экологические аспекты производства строительных материалов из отходов промышленности // Восьмые академические чтения РААСН «Современное состояние и перспективы развития строительного материаловедения». Самара, 2004. С. 47—50.
3. Каушанский В. Е., Баженова О. Ю. Энерго- и ресурсосбережения в технологии портландцемента за счет использования техногенных и нетрадиционных материалов // Седьмые академические чтения РААСН «Современные проблемы строительного материаловедения». Белгород, 2001. С. 201—204.
4. Кафаров В. В., Дорохов И. Н., Арутюнов С. Ю. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешивания сыпучих материалов. М, 1985. 440 с.
5. Ольгинский А. Г., Бершадский Ф. Г. Значение микрозаполнителя в формировании структуры и свойств бетона // Управляемая структура образования в производстве строительных материалов. Киев: Будивельник, 1998. С. 76—80.
6. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Строительные материалы из отходов промышленности. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 368 с.
7. Отходы ферросплавного производства — добавки высоконаполненных цементных бетонов / Л. А. Алимова, О. Ю. Пушкарская, Л. Н. Губанова, Т. К. Акчурин // Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов : материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. Волгоград : ВолГАСУ, 2011. С. 137—141.
8. Особенности формирования структуры цементных бетонов, наполненных шлаковыми отходами металлургических производств / Л. Н. Губанова, О. Ю. Пушкарская, Л. А. Алимова, Т. К. Акчурин // Вестник МГСУ. 2012. № 11. С. 152—158.
9. Glasser L. S. D. Osmotic Pressure and the Swelling of Gels // Cem. and Concr. Res. 1979. Vol. 9. № 4. Pp. 515—517. [doi:10.1016/0008-8846\(79\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(79)90050-4)
10. Glasser L. S., Kataoka N. On the Role of Calcium in the Alkali-Aggregate Reaction // Cem. and Concr. Res. 1982. Vol. 12. № 3. Pp. 321—331. [doi:10.1016/0008-8846\(82\)90080-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(82)90080-1)
11. Hobbs D. W., Gutteridge W. A. Particle size of aggregate and its influence upon the expansion caused by the alkali-silica reaction // Mag. Concr. Res. 1979. Vol. 31. № 109. Pp. 235—242. DOI: 10.1680/mac.1979.31.109.235
12. Kawamura Mitsunori, Takemoto Kunio. Effect of Silica Fume on Alkali-Silica Expansion and its Mechanism // Rev. 39nd Gen. Meet. Cem. Assoc. Jap. Techn. Sess., Tokyo, 1985, Synops. Tokyo, 1985. Pp. 258—261.
13. Особенности формирования структуры цементных бетонов, наполненных шлаковыми отходами металлургических производств / Л. А. Алимова, О. Ю. Пушкарская, Л. Н. Губанова, Т. К. Акчурин // Композиционные строительные материалы и конструкции : материалы . науч. конф., посвященной 100-летию А. М. Иванова. Воронеж: ВГАСУ, 2014. С. 124—128.
14. Алимова Л. А., Пушкарская О. Ю., Акчурин Т. К. Кремнеземистая добавка на основе шлака производства ферросплавов // Инженерно-экологические проблемы строительного комплекса региона : сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-техн. конф. ВолГАСУ, 3—4 июля 2014 г. Ч. I. Волгоград: ВолГАСУ, 2014. С. 29—32.

© Алимова Л. А., Акчурин Т. К., Пушкарская О. Ю., 2015

Поступила в редакцию
в марте 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Алимова Л. А., Акчури Т. К., Пушкарская О. Ю. Анализ механизма действия кремнеземсодержащей добавки на основе отходов металлургии в составах бетонных композиций // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 40(59). С. 127—134.

Об авторах:

Алимова Лилия Андреевна — аспирант кафедры строительных материалов и специальных технологий, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, lily-lily_88@mail.ru

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

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

L. A. Alimova, T. K. Akchurin, O. Yu. Pushkarskaya

**ANALYSIS OF MECHANISM OF SILICEOUS ADDITIVES
BASED ON WASTE FERROALLOYS AS PART OF CONCRETE COMPOSITES**

Wide range of application of dispersed ultrafine microfillers of technological nature as part of composites allow to create concrete of new generation with high strength, increased workability and durability. The introduction of disperse waste ferroalloys containing silicon as part of concrete composites allow to realize the unique properties of silica fume due to its effective combination with Portland cement. The high specific surface of the resulting product of ferroalloy production slag after crushing in combination with an amorphous structure of SiO₂ particles provides their reactivity worth and structure-forming significance in the composition of cement binder. The impact of ferroalloy production slag on the properties of concrete is mainly physical in nature, and later — both physical and chemical, which provides more dense structure of concrete and 30 % increase in its strength.

Key words: dispersed filler, ferroalloy slag, concrete composite.

REFERENCES

1. Turkina I. A. [The necessity and experience of use of waste products]. *Sbornik докладов V Mezhdunarodnogo kongressa po upravleniyu otkhodami i prirodookhrannym tekhnologiyam «VeistTek-2007»* [Coll. Of reports of V International Congress on Waste Management and Environmental Technology “WasteTech-2007”]. Moscow, 2007.
2. Bal'zannikov M. I., Petrov V. P. [Environmental aspects of construction materials production from industrial waste]. *Vos'mye akademicheskie chteniya RAASN «Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya stroitel'nogo materialovedeniya»* [Eighth academic reading of RAASN “Current state and development prospects of construction material engineering”]. Samara, 2004. Pp. 47—50.
3. Kaushanskii V. E., Bazhenova O. Yu. [Energy and resource efficiency in technology of Portland cement due to the use of man-made and innovative materials]. *Sed'mye akademicheskie chteniya RAASN «Sovremennye problemy stroitel'nogo materialovedeniya»* [Seventh academic reading of RAACS “Modern problems of construction material engineering”]. Belgorod, 2001. Pp. 201—204.
4. Kafarov V. V., Dorokhov I. N., Arutyunov S. Yu. *Sistemnyi analiz protsessov khimicheskoi tekhnologii. Protsessy izmel'cheniya i smeshivaniya sypuchikh materialov* [Systematic analysis of the processes of chemical technology. Processes of grinding and mixing of bulk materials]. Moscow, 1985. 440 p.
5. Ol'ginskii A. G., Bershadekii F. G. [Micro aggregate value in the formation of the structure and properties of concrete]. *Upravlyaemaya struktura obrazovaniya v proizvodstve stroitel'nykh materialov* [Controlled structure of development in production of construction materials]. Kiev, Budivel'nik Publ., 1998. Pp. 76—80.

6. Dvorkin L. I., Dvorkin O. L. *Stroitel'nye materialy iz otkhodov promyshlennosti* [Construction materials from the industrial wastes]. Rostov-on-Don, Phenix Publ., 2007. 368 p.
7. Alimova L. A., Pushkarskaya O. Yu., Gubanova L. N., Akchurin T. K. [Wastes of ferroalloy production — supplements of highly filled cement concrete]. *Nadezhnost' i dolgovechnost' stroitel'nykh materialov, konstruksii i osnovanii fundamentov : materialy VI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Reliability and durability of construction materials, structures and bases of foundations. VI Inter. Sci. and Eng. Conf. Proc.] Volgograd, VSUACE, 2011. Pp. 137—141.
8. Gubanova L. N., Pushkarskaya O. Yu., Alimova L. A., Akchurin T. K. [Peculiarities of structure formation of cement concretes filled with slag waste products of metal processing plants]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering], 2012, no. 11, pp. 152—158.
9. Glasser L. S. D. Osmotic Pressure and the Swelling of Gels. *Cem. and Concr. Res.*, 1979, 9(4), pp. 515—517. doi:10.1016/0008-8846(79)90050-4
10. Glasser L. S., Kataoka N. On the Role of Calcium in the Alkali-Aggregate Reaction. *Cem. and Concr. Res.*, 1982, 12(3), pp. 321—331. doi:10.1016/0008-8846(82)90080-1
11. Hobbs D. W., Gutteridge W. A. Particle size of aggregate and its influence upon the expansion caused by the alkali-silica reaction. *Mag. Concr. Res.*, 1979, 31(109), pp. 235—242. DOI: 10.1680/macr.1979.31.109.235
12. Kawamura Mitsunori, Takemoto Kunio. Effect of Silica Fume on Alkali-Silica Expansion and its Mechanism. Effect of silica-containing dust discharge to expand the interaction of concrete alkali-silica fillers and active mechanism of the reaction. *Rev. 39nd Gen. Meet. Cem. Assoc. Jap. Techn. Sess., Tokyo, 1985, Synops.* Tokyo, 1985. Pp. 258—261.
13. Alimova L. A., Pushkarskaya O. Yu., Gubanova L. N., Akchurin T. K. [Features of formation of the structure of cement concrete filled with slag waste of metallurgical production]. *Kompozitsionnye stroitel'nye materialy i konstruksii : materialy . nauch. konf., posvyashchennoi 100-letiyu A. M. Ivanova* [Composite construction materials and structures. Proc. Sci. Conf.]. Voronezh, VSUACE Publ., 2014. Pp. 124—128.
14. Alimova L. A., Pushkarskaya O. Yu., Akchurin T. K. [Siliceous slag additive based on the production of ferroalloys]. *Inzhenerno-ekologicheskie problemy stroitel'nogo kompleksa regiona : sb. nauch. tr. po materialam Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. VolgGASU, 3—4 iyulya 2014 g. Ch. I* [Engineering and environmental problems of the construction complex in the region. Proc. Intern. Sci. and Eng. Conf., VSUACE, July 3—4, 2014. p. I.]. Volgograd, VSUACE Publ., 2014. Pp. 29—32.

For citation:

Alimova L. A., Akchurin T. K., Pushkarskaya O. Yu. [Analysis of mechanism of siliceous additives based on waste ferroalloys as part of concrete composites]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturo-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 40(59), pp. 127—134.

About authors:

Alimova Liliya Andreevna — Postgraduate student of Construction Materials and Special Technologies Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, lily-lily_88@mail.ru

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

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

УДК 691.327.666

А. С. Голованова^а, Т. К. Акчурин^а, О. Ю. Пушкарская^б

^а *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

^б *Волжский институт строительства и технологий (ВИСТех) — филиал ВолгГАСУ*

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ СОСТАВОВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ

Разработка новых многокомпонентных полимерных композиций на основе отходов производства для гидроизоляции требует системного подхода в вопросах проектирования этих составов. Армирование и наполнение полимерных композиций для гидроизоляции способствует дополнительному усилению конструкций в целом. Сочетание многокомпонентной полимерной системы холодного отверждения (МПСХО) с наполнителями является одним из способов создания современных композиционных материалов с заданным комплексом свойств, отличающихся от свойств исходных компонентов, что позволяет получать материалы с совершенно новыми технологическими или эксплуатационными характеристиками. Модификация поверхности наполнителей ПАВ приводит к росту прочностных характеристик образцов за счет усиления адгезионного взаимодействия в межфазной зоне. Только научный подход к разработке составов МПСХО и их экспериментальная проработка в вопросах повышения прочностных характеристик, влагостойкости и химической стойкости полимерных композиционных материалов позволит оптимизировать составы и расширить область использования композиции в целом.

К л ю ч е в ы е с л о в а: армирование, наполнение, полимерная смесь, полимерные отходы, эпоксидная композиция.

Вопросы защиты бетонных поверхностей от воздействия воды, агрессивных сред, атмосферных воздействий остаются актуальными и требуют комплексного подхода: разработки составов на отечественных сырьевых материалах и технологий их изготовления, обеспечивающих стабильное качество покрытий и его низкую себестоимость. Номенклатура гидроизоляционных материалов представлена как зарубежными образцами, так и материалами отечественного производства. Качество отечественных материалов недостаточно стабильно, хотя и удовлетворяет рабочим параметрам. Качество импортных материалов для гидроизоляции теряется во время транспортировки, а время доставки иногда превышает срок их годности, аналоги местного производства оставляют желать лучшего, не имея стабильной базы исходных компонентов производства. Снижение цен пропиточных материалов не обеспечивает их качества.

Проблема дефицита и дороговизны исходных материалов для эпоксидных модифицированных гидроизоляционных композиций может решаться путем использования техногенных отходов полимерного и минерального состава. Возможности применения полимерных отходов при их модификации для гидроизоляционных композиций безграничны, как и синтез новых полимерных материалов, и в этом их большая притягательная сила и экономическая целесообразность для исследователей. Поэтому представляют определенный интерес исследования порошкообразного полимерного отхода, состоящего практически на 99,5 % из эпоксидной смолы. Разработка составов

полимерной композиции для гидроизоляций строительного назначения, представляющей собой многокомпонентную полимерную систему холодного отверждения (МПСХО), является актуальной задачей. Полученный состав представляет собой тонкодисперсный порошкообразный материал, что облегчает его доставку непосредственно к месту выполнения работ. Рекомендуемые растворители добавляются непосредственно перед нанесением гидроизоляции. МПСХО наносится без предварительной подготовки бетонных поверхностей. Обладая пропиточными свойствами, МПСХО при нанесении значительно сокращает операцию обработки бетонной поверхности и позволяет снизить дефектность цементного камня, что приведет к повышению прочности бетонной конструкции [1—5].

Для улучшения прочностных характеристик МПСХО ее можно армировать дисперсным материалом минеральной и органической природы, что сопровождается формированием нового комплекса свойств композиции за счет межфазных взаимодействий на границе раздела «полимер — твердое тело», к которым, прежде всего, относятся адсорбционные или молекулярные взаимодействия. Они ответственны за адгезию на межфазной границе, физические, механические и другие свойства наполненных систем. Межфазные взаимодействия определяют особенности структуры граничного слоя, характер молекулярной упаковки, молекулярную подвижность, морфологию и другие его свойства.

Особое внимание уделяется армированию полимеров, способствующих усилению конструкций. Сочетание МПСХО с наполнителями является важнейшим способом создания современных композиционных материалов с заданным комплексом свойств, отличающихся от свойств исходных компонентов, что позволяет получать материалы с совершенно новыми технологическими или эксплуатационными характеристиками. Для композиционных полимерных материалов различают два вида усиления:

высоконаполненные системы, в которых полимер служит для обволакивания армирующих элементов (длинные волокна), занимает в композиции меньший объем (20...50 %);

малонаполненные системы, в которых свойства композиции ближе к свойствам полимерной основы, а в качестве усиливающей фазы вводят небольшие количества коротких волокон или дисперсных частиц (5...25 %).

В соответствии с общепринятой классификацией наполнителей в гетерофазных полимерных составах наиболее часто используются: сферические элементы, кристаллический наполнитель, волокнистые, синтетические полимеры, образующие нитевидную сетчатую структуру [6—11].

Представляют научно-практический интерес исследования малонаполненных систем МПСХО, где в качестве наполняющей и усиливающей фазы используются дисперсные абразивные частицы (АЧ) (состав I) и дискретные углеродные волокна (УВ) (состав II), являющиеся отходами производства. Целесообразность выбора наполнителей многокомпонентной полимерной системы оценивалась по наличию ингредиентов вторичных материальных ресурсов в регионе и их рыночной стоимости.

Усиление полимеров определяет наличие наполнителя и возникновение определенных структур в наполненных полимерах, которое и обуславливает изменение свойств полимера. Под усилением полимерной композиции

МПСХО подразумевается рост прочности при диспергировании в полимерной матрице другой фазы (АЧ и УВ), более жесткой и прочной, чем основной полимер. Таким образом, усиление осуществляется при комбинировании полимерной системы и системы наполнителей, приводящем к «усреднению» их свойств, в свободном состоянии. Комплекс показателей механических свойств МПСХО может меняться в зависимости от формы частиц наполнителя. Для волокнистых углеродных наполнителей наиболее важен показатель разрушающего напряжения при растяжении, так как волокна в композиционном полимерном материале работают, в основном, на растяжение. Сжатие, изгиб и сдвиг являются определяющими для зернистых абразивных наполнителей, которые работают, в основном, на сжатие, но могут работать также на растяжение и сдвиг.

Смешивание сухих компонентов МПСХО составов I и II осуществлялось при нормальных условиях в лаборатории кафедры СМиСТ, реакция полимеризации наполненных МПСХО с отверждением протекает в течение 10...16 ч. Жизнеспособность МПСХО при температуре 20...23 °С составляет 4 ч, с повышением температуры воздуха жизнеспособность смесей уменьшается. Применять композицию рекомендуется при положительных температурах. Сухая полимерная смесь может храниться до 3 лет при условии влагонепроницаемости упаковки. Лучшими разбавителями эпоксидных смол являются глицидиловые эфиры: крезил-, бутил-, фенил-, фурилглицидиловые эфиры и глицидиловые эфиры α -разветвленных синтетических жирных кислот. Однако их высокая токсичность не позволяет рекомендовать эти эфиры для широкого применения. В проводимых исследованиях использовали разбавители кетоны, так как они считаются наилучшими растворителями для эпоксидных смол и композиций на их основе, способны растворять большие количества сополимера. Растворы имеют низкую вязкость, стабильны при хранении и не разрушаются при добавлении больших объемов разбавителей. Кетоны не обладают корродирующим действием и относительно нетоксичны [12, 7, 13].

Результаты испытаний прочностных характеристик наполненных составов МПСХО представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний прочности наполненных составов МПСХО

Прочность образцов	Контрольный образец	Составы наполненной композиции					
		Наименование наполнителей и их процент введения от массы полимерной основы					
		АЧ (I)		УВ (II)		АЧ + УВ (1:1)	
		5	15	5	15	5	15
$\sigma_{\text{разр}}$, МПа	2,5	2,6	2,5	3,8	4,3	4,5	5,5
$\sigma_{\text{сж}}$, МПа	36,5	40,2	40,5	38	39	53	59
$\sigma_{\text{изг}}$, МПа	13,5	14,3	15,0	24,3	25,6	28	30

Анализ результатов испытаний (табл. 1) показал, что рост прочностных характеристик образцов с нанесенным полимерным покрытием характерен для наполнения МПСХО как с абразивными частицами, так и с углеводными волокнами. Наиболее высокими показателями прочности обладают составы

при совместном присутствии наполнителей в соотношении 1:1. Увеличение содержания наполнителей от 5 до 15 % дает прирост прочности в среднем на 5 %. В сравнении с контрольным, бездобавочным образцом, прочность при разрыве увеличилась на 60 %, прочность при сжатии — на 50 %, прочность при изгибе — на 30 %.

К числу наиболее распространенных физико-химических явлений, происходящих на границе раздела фаз «наполнитель — полимер», относится смачивание. Хорошее смачивание поверхности наполнителя связующим — одно из необходимых условий получения полимерного композиционного материала бездефектной структуры, обладающего высокими физико-механическими свойствами.

В качестве химической добавки использовали полигидросилоксаны (КОЖ 136-41), которые добавляли при приготовлении полимерной композиции. Исследование влияния добавок на адгезию полимерной основы МПСХО к поверхности подложки при нанесении составов МПСХО на бетон в качестве гидроизоляции и дополнительного упрочнения представляет научно-практический интерес. С теоретической точки зрения улучшение смачивания поверхностей наполнителей и подложки модифицированной смесью МПСХО можно объяснить следующим.

Введенные в наполненный раствор МПСХО поверхностно-активные вещества адсорбируются на границе раздела фаз, образуя мономолекулярный слой, ориентированный строго определенным образом. Эти адсорбированные слои изменяют соотношение сил в системе и способствуют снижению поверхностной энергии связующего, что является необходимым условием смачивания.

Таблица 2

Адгезионные характеристики модифицированной композиции МПСХО

Наименование добавки	Концентрация c , %	Краевой угол смачивания θ , град.	Поверхностное натяжение $\sigma_{ж}$, мДж/м ²	Работа адгезии W_a , мДж/м ²	Работа когезии W_k , мДж/м ²	Коеф. растекания S	Отн. работа адгезии Z_a
МПСХО	—	23,64	41,58	80,90	85,70	-3,70	0,9629
КОЖ 136-41	0,1	23,39	40,87	79,37	84,18	-3,54	0,9648
	0,5	22,75	38,84	75,53	80,00	-3,24	0,9663
	1,0	22,73	38,21	74,31	78,66	-3,17	0,9668
	3,0	22,70	38,11	73,44	77,76	-3,13	0,9689

Помимо этого, используемая добавка способствует снижению вязкости МПСХО в результате взаимодействия с отдельными цепями и звеньями макромолекул. Изменяя конформацию цепей полимерной основы, добавка способствует образованию из них плотного ориентированного слоя на границе раздела фаз. Такое действие органических добавок позволяет увеличить число контактов макромолекул с поверхностью твердого тела и усилить адсорбционное взаимодействие в системе «полимер — наполнитель и наполненный полимер — подложка». Это, в свою очередь, улучшает смачивание контакти-

рующих поверхностей и способствует росту адгезии. Результаты эксперимента представлены в табл. 2.

Кремнийорганическая жидкость 136-41, введенная в состав МПСХО, значительно снижает поверхностное натяжение полимерной смеси, являясь для нее поверхностно-активной (ПАВ). С ростом концентрации ПАВ происходит закономерное снижение поверхностного натяжения. Так, при максимальной концентрации КОЖ 136-41 (3 %) поверхностное натяжение уменьшается на 8,7 %.

Процессы, протекающие на поверхности раздела «полимер — наполнитель (подложка)», объясняются с точки зрения адсорбционной теории адгезии, которая рассматривает адгезию как результат проявления сил молекулярного взаимодействия между молекулами адгезива и субстрата [7, 9, 10].

Кремнийорганическая жидкость 136-41, адсорбируясь на границе раздела фаз, способствует снижению поверхностного натяжения МПСХО. Происходит уменьшение краевого угла, повышается смачиваемость при снижении работы адгезии. Относительная работа адгезии композиции составляет 0,9629...0,9689, что приближается по значению к единице. Следовательно, силы сцепления между молекулами полимера и подложки приближаются по величине к силам сцепления молекул самого полимера. Это способствует формированию материала с однородной, бездефектной структурой.

Влияние химических добавок на изменение прочностных характеристик наполненной композиции МПСХО (АЧ + УВ) оценивали в зависимости от последовательности их введения в композицию. Предварительная обработка поверхности АЧ и УВ добавками КОЖ 136-41 и ГКЖ-10 существенным образом влияет на рост прочностных характеристик. Поверхность наполнителей обрабатывалась добавкой 3%-го содержания, при 5- и 15%-м содержании смеси наполнителей (АЧ + УВ). Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытаний прочности наполненных составов МПСХО

Прочность образцов	Составы наполненной композиции МПСХО			
	АЧ + УВ (1:1)		АЧ + УВ (1:1)	
	5	15	5	15
	КОЖ 136-41 (3 %)		ГКЖ-10 (3 %)	
$\sigma_{\text{разр}}$, МПа	4,5/5,2	5,5/6,1	4,5/4,9	5,5/5,8
$\sigma_{\text{сж}}$, МПа	53/61,2	59/65,3	53/60,7	59/63,9
$\sigma_{\text{изг}}$, МПа	28/32,8	30/33,6	28/30,8	30/32,6

По результатам эксперимента видно (табл. 3) изменение прочностных характеристик образцов с нанесенным покрытием в сторону роста за счет предварительной обработки поверхности наполнителей. Показатели прочности образцов в среднем возросли (значения под чертой, табл. 3) на 10...15 % в сравнении с образцами с немодифицированной поверхностью абразивных частиц и углеволокна.

Таким образом, при разработке наполненных многокомпонентных полимерных композиций детального внимания требует не только компонентный состав, но и технология их изготовления. Придание специальных характери-

стик разрабатываемым композициям МПСХО является одной из материаловедческих задач полимеров строительного назначения, связанной со структурными исследованиями полимерных композиций и вторичных ресурсов, с целенаправленной их переработкой, приготовлением и эксплуатацией изделий на их основе. Выбор ингредиентов полимерных композитов следует производить для каждого конкретного случая и области использования, пользуясь независимой экспертной оценкой. Универсальных полимерных составов не существует, и нецелесообразно стремиться к их поиску. Зачастую определяющим фактором при выборе компонентного состава являются область использования и требования заказчика, а также стоимость и надежность в конкретных условиях [13—16].

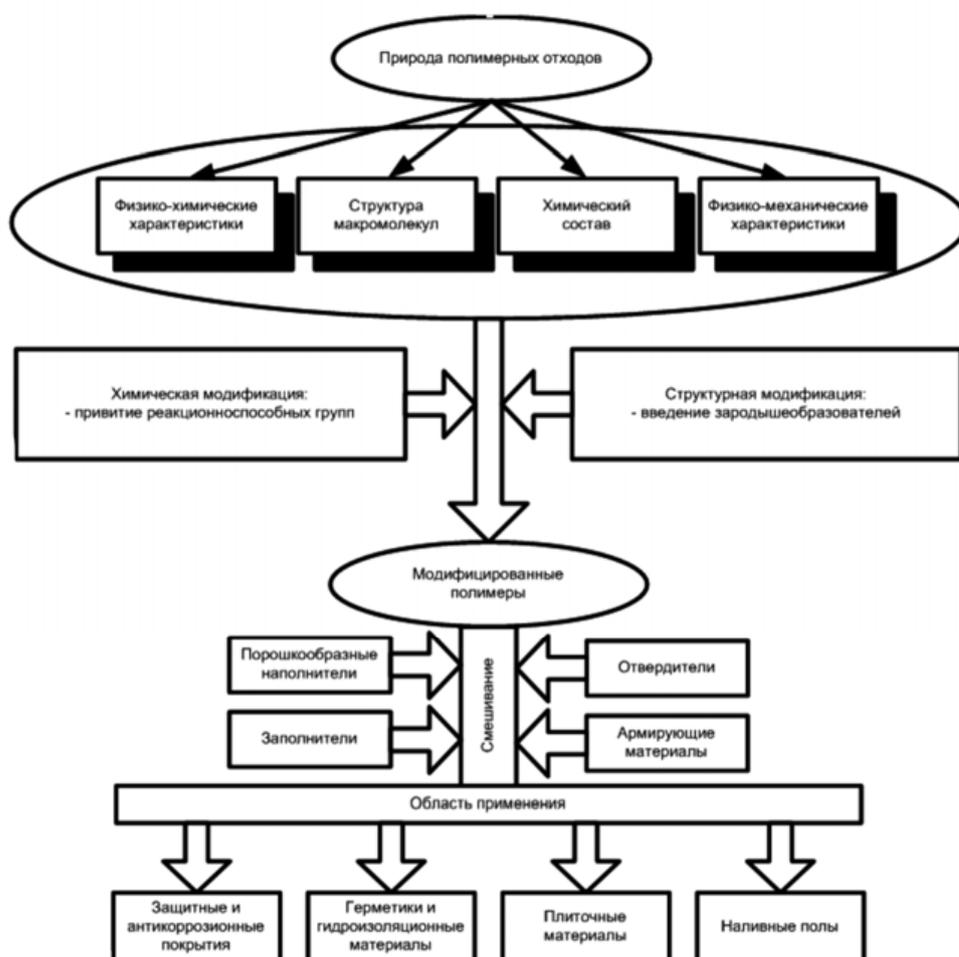


Схема проектирования полимерной композиции с использованием полимерных отходов

Предлагаемая схема проектирования многокомпонентных полимерных композиций основывается на изучении исходных полимерных отходов, на структурном подходе к модификации полимерной матрицы с учетом возможных областей использования полученных составов, позволяет определить

рациональный путь проектирования МПСХО, соотносясь с предлагаемыми условиями эксплуатации (рис.).

Анализ результатов проведенных экспериментов свидетельствует о необходимости системного подхода к разработке составов МПСХО и их научной проработки в вопросах повышения прочностных характеристик, влагостойкости и химической стойкости полимерных композиционных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зарубина Л. П. Гидроизоляция конструкций, зданий и сооружений. СПб.: БВХ-Петербург, 2011. 272 с.
2. Батаев А. А., Батаев В. А. Композиционные материалы. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 384 с.
3. Калашикова А. С., Пушкарская О. Ю. Гидроизоляция строительного назначения — мировой и отечественный опыт // Инженерные проблемы строительного материаловедения, геотехнического и дорожного строительства : материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. Волгоград : ВолгГАСУ, 2013. С. 204—206.
4. Калашикова А. С., Акчурин Т. К., Пушкарская О. Ю. Полимерная система на основе отходов производства для гидроизоляции строительных конструкций // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал АИСИ. 2014. Вып. 1 (7). С. 53—57.
5. Калашикова А. С., Акчурин Т. К., Пушкарская О. Ю. Многокомпонентная полимерная система для гидроизоляции строительных конструкций // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2013. Вып. 35 (54). С. 99—105.
6. Белобородов И. И., Сухоставец С. В. Влияние гидрофобизации порошков наполнителей на свойства композиционных материалов на полимерной основе // Порошковая металлургия. 2006. № 9/10. С. 31—34.
7. Соломатов В. И., Добрыщев А. Н., Химпер Г. К. Полимерные композиционные материалы в строительстве. М. : Стройиздат, 1988.
8. Чуйко А. В., Овчинников В. М. О влиянии минеральных наполнителей на некоторые свойства эпоксидных бетонов // Структурообразование и органическая коррозия цементных и полимерных бетонов : сб. статей. Саратов, 1967. С. 197—206.
9. Готлиб Е. М. О роли адсорбционных взаимодействий связующего с наполнителем в формировании фазовой структуры и свойств наполненных эпоксидных полимеров // Композиционные полимерные материалы : сб. науч. трудов. Киев : Наукова думка, 1988. С. 4—8.
10. Журков С. Н., Куксенко В. С., Слущер А. И. Микромеханика разрушения полимеров // Проблемы прочности. 1971. № 2. С. 45—50.
11. Защитные покрытия строительных конструкций / под ред. И. И. Ожиганова, Ю. Н. Зенченко. Киев : Будивельник, 1980. 160 с.
12. Оудиан Дж. Основы химии полимеров / пер. с англ. под ред. З. Г. Роговина. М. : Химия, 1976. 326 с.
13. Зубов П. И., Сухорева Л. А. Структура и свойства полимерных покрытий. М. : Химия, 1982. 25 с.
14. Swaminatham V., Kildsig D. O. Polydisperse powder mixtures: effect of particle size and shape on mixture stability // Drug Dev Ind Pharm. 2002. No. 28 (1). Pp. 41—48.
15. The Preparation and Characteristics of Concrete — Polymer Composites / M. Steinberg // Multicomponent Polymer Systems, American Chemical Society, Advances in Chemistry. Washington : N.A.J. Platzer, 1971. № 9. Pp. 547—561.
16. Furr Howard L. Moisture penetration in concrete with surface coatings and overlays // Highway Res. Rec. 1973. № 423. Pp. 17—26.

© Голованова А. С., Акчурин Т. К., Пушкарская О. Ю., 2015

Поступила в редакцию
в марте 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Голованова А. С., Акчурин Т. К., Пушкарская О. Ю. Системный подход к разработке составов многокомпонентных композиций на основе полимерных отходов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 40(59). С. 135—143.

Об авторах:

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

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

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

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

**SYSTEMATIC APPROACH TO THE DESIGN OF MULTICOMPONENT COMPOSITES
BASED ON POLYMERIC WASTES**

Development of new multicomponent polymer compositions based on waste products for waterproofing requires a systematic approach in the design of these compounds. Reinforcing and filling of polymeric compositions for waterproofing structures contributes to further enhancement in general. Combination of multicomponent polymeric system of cold freezing (MPSCF) with fillers is one of the ways to create advanced composite materials with the given set of properties that differ from those of the original components, which allows to obtain materials with completely new technology or performance. Modification of surfactant filler's surface increases the strength characteristics of the samples by increasing the adhesive interactions in the interphase region. Only a scientific approach to the development of MPSCF composites and their experimental study in improving strength characteristics, moisture resistance and chemical resistance of polymer composites will optimize the composites and extend the use of the composition as a whole.

Key words: reinforcement, filling, polymer blend, polymer wastes, epoxy composition.

REFERENCES

1. Zarubina L. P. *Gidroizolyatsiya konstruksii, zdanii i sooruzhenii* [Waterproofing of constructions, buildings and structures]. Saint-Petersburg, CVS-Petersburg Publ., 2011. 272 p.
2. Bataev A. A., Bataev B. A. *Kompozitsionnye materialy* [Composite Materials]. Novosibirsk, Publishing House of Novosibirsk State Technical University, 2002. 384 p.
3. Kalashnikova A. S., Pushkarskaya O. Yu. [Waterproofing of construction purposes — international and domestic experience]. *Inzhenernye problemy stroitel'nogo materialovedeniya, geotekhnicheskogo i dorozhnogo stroitel'stva : materialy IV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Engineering problems of construction material engineering, geotechnical and road construction. Proc. of IV Int. Sci. and Eng. Conf. Volgograd, VSUACE Publ., 2013. Pp. 204—206.
4. Kalashnikova A. S., Akchurin T. K., Pushkarskaya O. Yu. [Polymer system based on waste products for waterproofing of building structures]. *Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik Prikaspiya : nauchno-tekhnicheskii zhurnal AISI* [Engineering and construction news of Caspian Sea region: scientific and engineering magazine AISI], 2014, 1 (7), pp. 53—57.
5. Kalashnikova A. S., Akchurin T. K., Pushkarskaya O. Yu. [Multicomponent polymer system for waterproofing of building structures]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2013, no. 35 (54), pp. 99—105.

6. Beloborodov I. I., Sukhostavets S. V. Effect of hydrophobization of powdered fillers on properties of polymer-based composites. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2006. 45(9-10), pp. 429—431.
7. Solomatov V. I., Dobryshchev A. N., Himper G. K. *Polimernye kompozitsionnye materialy v stroitel'stve* [Polymer composite materials in construction]. Moscow, Stroizdat Publ., 1988.
8. Chuiko A. V., Ovchinnikov V. M. [The influence of mineral fillers on some properties of epoxy concrete] // *Strukturoobrazovanie i organogennaya korroziya tsementnykh i polimernykh betonov : sb. statei* [Structurization and biogenic corrosion of cement and polymer concrete. Sat. articles]. Saratov, 1967. Pp. 197—206.
9. Gotlib E. M. [The role of adsorption interactions of binder with filler in the formation of the structure and properties of filled epoxy polymers]. *Kompozitsionnye polimernye materialy : sb. nauch. trudov* [Composite polymeric materials. Sat. scientific. Works]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1988. Pp. 4—8.
10. Zhurkov S. N., Kuksenko V. S., Slutsker A. I. Micromechanics of the failure of polymers. *Strength of Materials*, 1971, 3(2), pp. 162—167.
11. Ozhiganov I. I., Zenchenko Yu. N. (ed.). *Zashchitnye pokrytiya stroitel'nykh konstruksii* [Protective coatings of constructions]. Kiev, Budivelnik Publ., 1980. 160 p.
12. Oudian J. *Osnovy khimii polimerov* [Fundamentals of polymer chemistry]. Moscow, Khimiya Publ., 1976. 326 p.
13. Zubov P. I., Sukhoreva L. A. *Struktura i svoistva polimernykh pokrytii* [Structure and properties of polymer coatings]. Moscow, Khimiya Publ., 1982. 25 p.
14. Swaminatham V., Kildsig D. O. Polydisperse powder mixtures: effect of particle size and shape on mixture stability. *Drug Dev Ind Pharm*, 2002, no. 28 (1), pp. 41—48.
15. Steinberg M. The Preparation and Characteristics of Concrete - Polymer Composites. *Multi-component Polymer Systems, American Chemical Society, Advances in Chemistry*. Washington, N.A.J. Platzer, 1971, no. 9, pp. 547—561.
16. Furr Howard L. Moisture penetration in concrete with surface coatings and overlays. *Highway Res. Rec.*, 1973, no. 423, pp. 17—26.

For citation:

Golovanova A. S., Akchurin T. K., Pushkarskaya O. Yu. [Systematic approach to the design of multicomponent composites based on polymeric wastes]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 40(59), pp. 135—143.

About authors:

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

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

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

УДК 621.922:621.895

О. В. Душко

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ КАРБИДКРЕМНИЕВОЙ КЕРАМИКИ В СРЕДЕ СОЖ

Ведение процессов абразивной обработки высокотвердых керамических материалов без применения специальных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) приводит к выходу из строя дорогостоящего абразивного инструмента и к разрушению поверхностного слоя заготовки. В работе рассмотрены процессы взаимодействия СОЖ с поверхностями заготовки и инструмента и даны рекомендации по подбору эффективного состава жидкости для получения поверхности детали заданного качества при оптимальных режимах обработки.

Ключевые слова: высокотвердая керамика, алмазное шлифование, алмазная обработка, смазочно-охлаждающая жидкость, диспергирование материала, суперфиниширование керамики.

На процесс абразивного диспергирования керамики весьма заметное влияние оказывает окружающая среда — специальные смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ). Действие их выражается в снижении поверхностной прочности материала вследствие адсорбционного взаимодействия, а также влияния на динамику контактных взаимодействий инструмента и детали. Важно подчеркнуть, что интенсивность адсорбционного понижения прочности при деформации и разрушении во многом зависит от характера внешнего силового воздействия [1—4].

С целью определения гидродинамического влияния среды (СОЖ) нами была принята схема шлифования изделия бруском, совершающим возвратно-поступательное движение при вращающейся детали [5] (рис. 1).

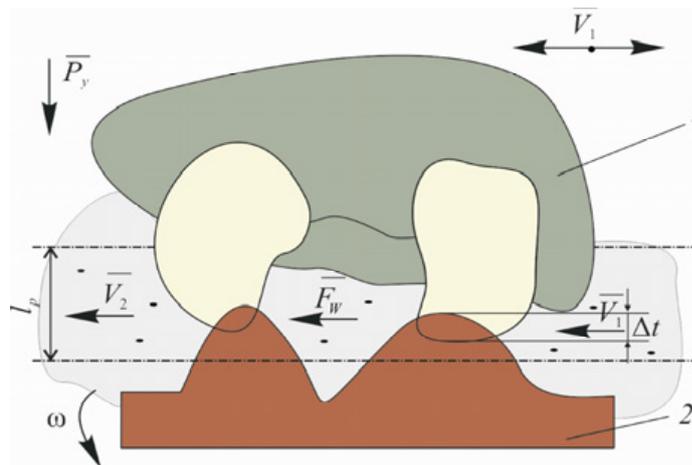


Рис. 1. Схема контакта бруска и обрабатываемой поверхности: 1 — брусок; 2 — деталь

В процессе диспергирования инструмент 1 прижимается к поверхности детали 2 с силой P_y и совершает возвратно-поступательные движения со скоростью V_1 в плоскости, перпендикулярной вектору скорости $\vec{\omega}$, с которой деталь 2 вращается. Алмазные зерна, внедряясь в обрабатываемый материал на глубину Δt и совершая сложное движение по поверхности 2 , диспергируют его.

Считаем, что жидкость поступает со скоростью V_1 в зону контакта (зазор l_p) за счет прилипания к поверхности обрабатываемой детали 2 . При этом толщина пленки жидкости, фиксируемой поверхностью твердого тела, пропорциональна динамической вязкости жидкости и скорости ее перемещения:

$$\delta \sim \sqrt{\frac{\mu}{V}}, \quad (1)$$

где μ — динамическая вязкость жидкости, Па·с; V — скорость перемещения в жидкости твердого тела, м/с.

Смазочно-охлаждающая жидкость транспортируется в зону контакта l_p в виде пленки толщиной δ , где в нее попадают не только частицы диспергируемого материала, но и продукты износа инструмента [6, 7]. По этой причине в контактной зоне образуется суспензия — СПД, состоящая из смазочно-охлаждающей жидкости и продуктов диспергирования как керамики, так и самого инструмента [8, 9]. Очевидно, движение жидкости вместе с продуктами диспергирования материала является неустановившимся ввиду изменения скорости частиц на входе и выходе из контактной зоны. В этом случае изменяется кинетическая энергия жидких и твердых частиц в объеме W , т. е.

$dT = \frac{\rho V^2}{2} dV$. Кинетическая энергия для всей массы жидкости:

$$T = \int_0^W \frac{\rho V^2}{2} dW, \quad (2)$$

где V — скорость частицы, м/с, меняющаяся от V_1 на входе до V_2 на выходе из объема W .

При неустановившемся движении $V = f(t)$ кинетическую энергию суспензии с некоторыми математическими преобразованиями можно записать:

$$T = \frac{V_1^2}{2} \int_0^W \rho \left(\frac{V_2}{V_1} \right) dW = m_w \frac{V_1^2}{2}, \quad (3)$$

здесь $m_w = \int_0^W \rho \left(\frac{V_2}{V_1} \right) dW$, (m_w имеет размерность массы).

Таким образом, кинетическую энергию всей суспензии, заключенной в объеме W , можно представить как кинетическую энергию некоторого конечного объема, имеющего массу m_w , движущегося со скоростью центра масс.

Имея в виду, что изменение кинетической энергии жидкости равно работе силы, можно определить и силу, действующую на жидкость и твердые частицы:

$$dT = F_w ds,$$

где ds — элемент пути, пройденного частицей суспензии.

Тогда обобщенная сила:

$$F_w = \frac{dT}{ds} = \frac{dT}{dt} \frac{dt}{ds} = \frac{1}{V} \frac{dT}{dt}.$$

С учетом (3):

$$F_w = m_w \frac{dV}{dt}. \quad (4)$$

Следовательно, в замкнутом объеме W действует гидродинамическая сила, пропорциональная ускорению частиц суспензии.

На наш взгляд, именно сила F_w удаляет СПД из зазора l_p и предотвращает образование структурированного слоя из продуктов диспергирования.

Следует учитывать, что движению системы СПД в зоне зазора (l_p) в значительной мере препятствуют силы сопротивления, возникающие вследствие вязкости (внутреннего трения) в ее объеме, а также адгезионные составляющие процессов взаимодействия рабочей поверхности инструмента с частицами твердой фазы (продуктами диспергирования). Именно поэтому возникает необходимость и важность оценки положения плоскости сдвига системы СПД в зазоре l_p . Представляется оптимальным случай, когда имеет место совпадение нижней границы коагуляционной структуры у поверхности инструмента с верхней границей зоны зазора — l_p [10].

С целью определения координаты плоскости сдвига системы СПД при течении ее в зазоре l_p (рис. 1 и 2) было принято допущение, что напряжения сдвига на плоскостях 1 и 2 будут равны:

$$\tau_{1,2} = \eta \frac{V}{l_p}, \quad (5)$$

где η — кинематическая вязкость жидкости, m^2/c ; V — скорость перемещения в жидкости твердого тела, m/c ; l_p — величина зазора, m .

Обратим внимание, что при контакте «инструмент — деталь» сила трения на плоскости 1 направлена против движения, а на плоскости 2 — в сторону движения системы СПД, и выражение (5) не учитывает того факта, что поверхность 1 инструмента имеет значительно большую шероховатость по сравнению с поверхностью 2, и что шероховатость имеет случайный характер. Поэтому применение данного уравнения для расчета напряжения сдвига в нашем случае требует некоторой корректировки.

При определении напряжений на плоскости 1 мы исходили из того, что поверхность инструмента можно представить в виде некоторой «гребенки», выступы которой имеют форму цилиндров диаметром d (рис. 2).

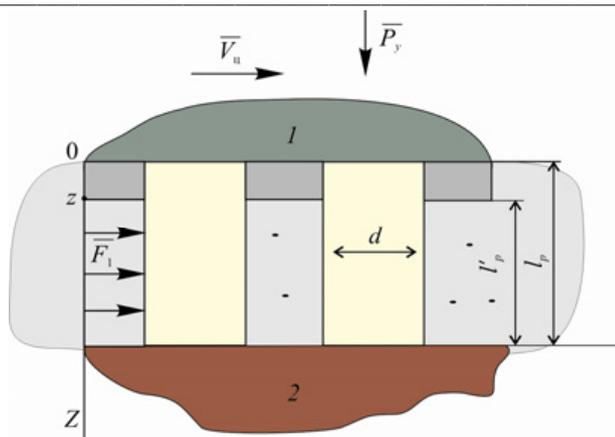


Рис. 2. Модель контакта «инструмент — деталь» при абразивном диспергировании материала: 1 — брусок; 2 — деталь; d — диаметр алмазного зерна основной фракции

При движении в зазоре l_p система СПД испытывает сопротивление своему течению вследствие обтекания микровыступов «гребенки». Эту силу сопротивления можно определить на основании закона динамического подобия И. Ньютона:

$$\frac{F_1}{\rho_1 V_1^2 S_1} = \frac{F_2}{\rho_2 V_2^2 S_2}.$$

С учетом (4) и по уравнению Ландау — Лившица для перемещения цилиндра радиусом r в потоке вязкой жидкости

$$dF_w = \frac{4\pi\mu V dl_p}{\frac{1}{2} - C - l_p N \frac{dV_u}{4\eta}}, \quad (6)$$

где d — диаметр цилиндра; μ — динамическая вязкость жидкости; C — число Эйлера; V_u — скорость перемещения цилиндра; V — скорость суспензии; η — кинематическая вязкость жидкости; l_p — величина зазора.

Силу сопротивления течению жидкости по поверхности определим, принимая во внимание, что N — количество цилиндров в зоне контакта, а длина их образующих — $2/3d$, следующим образом:

$$F_{w1} = \frac{2}{3} Nd \frac{4\pi\mu V}{\frac{1}{2} - C - l_p N \frac{dV_u}{8\eta}}. \quad (7)$$

Сила, препятствующая движению жидкости по обрабатываемой поверхности детали (рис. 2), описывается следующим выражением:

$$F_{w2} = S\eta \frac{V_u}{Z}, \quad 0 \leq Z \leq l_p, \quad (8)$$

где Z — координата плоскости сдвига; S — площадь контакта тел 1 и 2; η — кинематическая вязкость жидкости; V_u — скорость перемещения цилиндра.

Вынос СПД из рабочей зоны происходит за счет адгезии жидкой среды к поверхности детали, которая, как было показано выше, совершает вполне определенное движение и зависит от ускорения частиц суспензии. Очевидно, что для рассматриваемого случая можно записать следующее:

$$F_{w1} = F_{w2}. \quad (9)$$

Определяя координату Z и учитывая (8) и (9), получим следующее равенство:

$$S\eta \frac{V_u}{Z} = \frac{2}{3} Nd \frac{4\pi\mu V_u}{\frac{1}{2} - C - l_p N \frac{dV_u}{8\eta}}. \quad (10)$$

Из выражения (10) координата плоскости сдвига Z может быть определена следующим образом:

$$Z = \frac{3}{8} \frac{S}{\pi Nd} \left(\frac{1}{2} - C - l_p N \frac{dV_u}{8\eta} \right). \quad (11)$$

Принимая число Эйлера для детали и инструмента соответственно C_1 и C_2 , запишем: $C_1 = \frac{3S}{8\pi Nd}$, а $C_2 = l_p N \frac{dV_u}{8\eta}$, следовательно, для (8):

$$Z = -C_1 (C + C_2 - 0,5). \quad (12)$$

Тогда для определения l'_p (высоты контактной зоны) будет справедлива следующая зависимость (рис. 2):

$$l'_p = l_p - Z. \quad (13)$$

На основании (3) заключаем, что высота контактной зоны l'_p зависит как от реологических характеристик системы СПД в контактной зоне, так и от констант, которые определяют микрогеометрию и алмазного бруска, и детали. Обратим внимание, что микрогеометрия инструмента и детали являются величинами переменными и носят случайный характер. Поэтому величину зазора l_p , равную расстоянию между математическими ожиданиями неровностей («гребенка»), можно характеризовать дисперсией, представляющей собой квадрат среднеквадратичного отклонения неровностей от математического ожидания. На основании этого примем эмпирическую зависимость:

$$l_p = 2,7kp^{-0,078} \sqrt{D_3 - D_d} - 1,55N_3^{0,11} \sqrt{D_3}, \quad (14)$$

где p — давление в контакте; D_3 — дисперсия режущего профиля инструмента; D_d — дисперсия профиля детали; k — коэффициент размерности, $k = 1$; N_3 — число алмазных зерен в контакте.

Величина D_3 определялась по формуле:

$$D_3 = 0,0156\delta_3^2, \quad (15)$$

где δ_3 — ширина зерна предельной фракции.

Величина D_d — дисперсия профиля детали — может быть подсчитана по формуле:

$$D_d = \frac{\pi}{2} R_a^2, \quad (16)$$

где R_a — среднее арифметическое отклонение профиля детали.

Количество зерен, находящихся в контакте, определим следующим образом:

$$N_3 = \frac{B}{\lambda}, \quad (17)$$

где B — ширина контактной зоны «брусочек — деталь»; λ — шаг между абразивными зёрнами.

Таким образом, диспергирование карбидкремниевой керамики происходит при неустановившемся движении среды «СОЖ — продукты диспергирования», которое подчиняется законам гидродинамики и может быть описано уравнениями движения жидкости с действующими на нее силами. На границе раздела фаз системы «СОЖ — частицы диспергированного материала» в результате адсорбции поверхностно-активных веществ (ПАВ) возникает межфазный слой, что создает определенный структурно-механический барьер, величина которого определяет сопротивление сдвигу всей коллоидной системы СПД [11, 12].

Операция суперфиниширования является завершающим этапом обработки высокотвердой керамики с целью получения рабочей поверхности детали с заданными характеристиками. Как известно, в процессах суперфиниширования алмазный брусочек совершает колебательные движения по поверхности обрабатываемой детали: при этом происходит контактное взаимодействие около 10 000 микрочерен с поверхностью керамики в условиях ее упругопластического деформирования. Это, естественно, приводит к накоплению дефектов в деформируемом микрообъеме, и, при достижении их критической плотности, развиваются субмикроскопические несплошности, которые превращаются в свободные поверхности. В конечном итоге эти поверхности сливаются и образуют трещины, что приводит к отделению микрообъема материала, то есть его диспергированию [13—15].

Считаем, что интенсивность алмазного диспергирования карбидкремниевой керамики можно характеризовать безразмерным критерием J_m , равным отношению объема диспергированного слоя к некоторому объему замкнутого пространства W :

$$J_m = \frac{\sum_{i=1}^k \varrho_i}{W}, \text{ или} \\ J_m = \frac{\sum_{i=1}^k \varrho_i}{N_0 S l}, \text{ при } \begin{cases} 1 \leq N_0 \leq \infty, \\ N_0 = 1, \end{cases} \quad (18)$$

где $\sum_{i=1}^k Q_i$ — объем диспергируемого слоя материала; S — фактическая площадь контакта зерен с материалом; l — длина пути, проходимого инструментом по поверхности детали; N_0 — критическое число воздействий алмазного зерна на микрообъем материала, приводящее к его разрушению.

Объем диспергируемого слоя Q_i можно определить на основании исследований известного триболога профессора И. В. Крагельского [16], принимая, что Q_i равен объему деформируемого слоя материала:

$$Q_i = 0,5CV_{ц}T_{д}L \left\{ 2\sigma\Phi_0\left(\frac{l_p}{\sigma}\right) - l_p \left[1 - 2\Phi_0\left(\frac{l_p}{\sigma}\right) \right] \right\}, \quad (19)$$

где $V_{ц}$ — скорость диспергирования обрабатываемого материала; Φ_0 — функция Лапласа, определяется по таблицам в зависимости от математического ожидания и среднего квадратичного отклонения случайной величины; σ — суммарное среднее квадратичное отклонение микропрофилей контактирующих поверхностей; $T_{д}$ — время диспергирования; l_p — величина зазора; C — число Эйлера, характеризующее отношение между силами давления на единицу объема жидкости W и инерционными силами; L — длина контакта.

Если принять $\Theta = 0,5CV_{ц}T_{д}L$, то (19) примет вид:

$$Q_i = \Theta \left\{ 2\sigma\Phi_0\left(\frac{l_p}{\sigma}\right) - l_p \left[1 - 2\Phi_0\left(\frac{l_p}{\sigma}\right) \right] \right\}. \quad (20)$$

Учитывая теоретические исследования [17] для определения высоты контактной зоны и вышеприведенные рассуждения относительно величины зазора, уравнение (20) можно записать следующим образом:

$$Q_i = \Theta \left\{ 2\sigma\Phi_0\left(\frac{l_p - z}{\sigma}\right) - (l_p - z) \left[1 - 2\Phi_0\left(\frac{l_p - z}{\sigma}\right) \right] \right\}. \quad (21)$$

Для фактической площади контакта зерен бруска и обрабатываемой поверхности приемлемо следующее:

$$S = BL \left[1 - \Phi_0\left(\frac{l_p + m_c}{D_3 + D_d}\right) \right], \quad (22)$$

где BL — площадь контактной зоны, м²; B — ширина контактной зоны, м; L — длина контактной зоны, м; m_c — математическое ожидание профиля инструмента; l_p — величина зазора.

Произведя замену $D_c = \sqrt{D_3 + D_d}$, можно получить:

$$S = D_c \left[1 - \Phi_0\left(\frac{(l_p - z) + m_c z}{m_c}\right) \right]. \quad (23)$$

Для определения величины N_0 , которая характеризует критическое число воздействий абразивного зерна на деформируемый микрообъем, необходимо рассмотреть замкнутую систему «инструмент — деталь». Ранее показано, что поверхностное диспергирование твердого тела при финишной обработке можно рассматривать как процесс его усталостного разрушения, которое имеет место при трении в адсорбционно-активной среде. Из учения И. В. Крагельского вытекает, что число нарушений фрикционных связей двух тел при их упруго-пластическом контакте в отсутствии смазки, приводящее к разрушению одного из них, определяется уравнением [17]:

$$N_0 = \left(\frac{l_0}{l_\varepsilon} \right)^{t_n}, \quad (24)$$

где l_0 — критическое значение деформации при однократном нагружении (константа, близкая к разрывному относительному удлинению Δ); l_ε — действующее амплитудное значение деформации; t_n — показатель степени кривой фрикционной усталости (для большинства материалов для случая упруго-пластического контакта $t_n = 2 \dots 3$).

Для определения l_ε И. В. Крагельский предлагает следующую зависимость [16]:

$$l_\varepsilon = \frac{l_n}{2\pi} \sqrt{\beta \frac{\Delta_3 + 2fHV}{\Delta_3 - 2fHV}}; \quad f < \frac{\Delta_3}{2HV}, \quad (25)$$

где f — коэффициент трения при взаимном перемещении двух твердых тел; HV — микротвердость по Виккерсу изнашиваемого тела; β — параметр опорной кривой разрушаемого тела; Δ_3 — предел текучести разрушаемого тела; l_n — средний диаметр фактического пятна контакта двух тел в направлении скольжения.

С целью определения среднего диаметра фактического пятна контакта «зерно — материал» l_n можно разделить правую часть (23) на длину контакта L и число зерен N_3 . Получится следующее уравнение для расчета:

$$l_n = \frac{D_c}{N_3 L} \left[1 - \Phi_0 \left(\frac{(l_p - z) + m_c z}{m_c} \right) \right]. \quad (26)$$

После подстановки (26) в (25) получится:

$$l_\varepsilon = \frac{D_c}{2\pi N_3 L} \left[1 - \Phi_0 \left(\frac{(l_p - z) + m_c z}{m_c} \right) \right] \sqrt{\beta \frac{\Delta_3 + 2fHV}{\Delta_3 - 2fHV}}. \quad (27)$$

Введем следующую замену:

$$i = \sqrt{\beta \frac{\Delta_3 + 2fHV}{\Delta_3 - 2fHV}}. \quad (28)$$

Тогда, используя (21), можно рассчитать критическое число воздействий алмазного зерна на микрообъем материала, приводящее к его разрушению:

$$N_0 = \left[\frac{2\pi N_3 L l_0}{1 - \Phi_0 \left(\frac{(l_p - z) + m_c \cdot z}{m_c} \right)} \right]^i \cdot \quad (29)$$

Таким образом, для расчета интенсивности алмазного диспергирования материала J_m , в частности высокотвердой керамики, предлагается использовать зависимость (18). Входящие в (18) показатели можно определить: объем диспергируемого слоя материала Q_i — по (21); фактическую площадь контакта зерен с материалом S — по (23); длину пути, проходимого инструментом по поверхности детали l — по (27), критическое число воздействий алмазного зерна на микрообъем N_0 — по (29).

Уравнение (18) позволяет рассчитать ожидаемую интенсивность диспергирования материала, располагая параметрами, входящими в него. Это представляет практическую ценность при определении режимов механической обработки высокотвердой керамики, а также при создании новых составов СОЖ с целью определения наиболее эффективного их применения в различных областях машиностроения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Душко О. В., Шумячер В. М. Алмазное шлифование карбидкремниевой керамики для машиностроения : моногр. Волгоград : ВолГАСУ, 2009. 80 с.
2. Dushko O. V., Shumyacher V. M. More efficient diamond grinding of superhard ceramics // Russian Engineering Research. 2011. Т. 31. № 6. С. 619—622.
3. Lyckfeldt O., Ferreira J. M. F. Processing of porous ceramics by starch consolidation // Journal of the European Ceramic Society. 1998. Т. 18. № 2. Рр. 131—140.
4. Душко О. В. Влияние состава смазочно-охлаждающей жидкости на процесс финишной обработки высокотвердых керамических материалов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2011. Вып. 25(44). С. 171—177.
5. Душко О. В., Шумячер В. М., Баширцева И. В. Динамика контактного взаимодействия инструмента и детали при абразивном диспергировании // Абразивное производство : сб. науч. тр. Челябинск : ЮУрГУ, 2005. С. 131—138.
6. Sepulveda P., Binner J. G. P. Processing of cellular ceramics by foaming and in situ polymerisation of organic monomers // Journal of the European Ceramic Society. 1999. Т. 19. № 12. С. 2059—2066.
7. On the processing of nanocrystalline and nanocomposite ceramics / В. Н. Kear, J. Colaizzi, W. E. Mayo, S. C. Liao // Scripta Materialia. 2001. Т. 44. № 8-9. Рр. 2065—2068.
8. Development of a curved layer lom process for monolithic ceramics and ceramic matrix composites / George A. Graves, Allan Lightman, Gyoowan Han, Akos Bezeredi, Stan Rodrigues // Rapid Prototyping Journal. 1999. Т. 5. № 2. С. 61—71.
9. Шумячер В. М. Прогнозирование работоспособности шлифматериалов в процессах абразивной обработки // Материалы и технологии XXI века : сб. ст. III Междунар. науч.-техн. конф. Пенза : Приволжский Дом Знаний, 2005. С. 90—92.
10. Душко О. В., Шумячер В. М., Баширцева И. В. Математическая модель процесса абразивного диспергирования металла // Технология машиностроения. 2005. № 12. С. 46—50.
11. Шумячер В. М., Душко О. В., Баширцева И. В. Исследование влияния смазочно-охлаждающей жидкости на износ доводочных брусков и качество обработанной поверхности // Сб. науч. тр. XXV Российской школы по проблемам науки и технологий. Екатеринбург : УРО РАН, 2005. С. 212—214.
12. Ma J., Tan G. E. B. Processing and characterization of metal-ceramics functionally gradient materials // Journal of Materials Processing Technology. 2001. Т. 113. № 1-3. С. 446—449.

13. Душко О. В. Оценка толщины дефектного слоя высокотвердой керамики при алмазном шлифовании // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 7 (110). С. 19—21.

14. Effect of ceramic processing methods on photostrictive ceramics / P. Poosanaas, A. Dogan, A. V. Prasadarao, S. Komarneni, K. Uchino // *Advanced Performance Materials*. 1999. Т. 6. № 1. С. 57—69.

15. Processing of cordierite based ceramics from alkaline-earth-aluminosilicate glass, kaolin, alumina and agnesite / D. U.Tulyaganov, M. E. Tukhtaev, J. I. Escalante, M. J. Ribeiro, J. A. Labrincha // *Journal of the European Ceramic Society*. 2002. Т. 22. № 11. С. 1775—1782.

16. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 380 с.

17. Душко О. В., Шумячер В. М. Повышение эффективности алмазного шлифования высоко-твердых керамических материалов // Станки и инструмент. 2011. № 3. С. 32—37.

© Душко О. В., 2015

Поступила в редакцию
в марте 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Душко О. В. Гидродинамический анализ условий диспергирования карбидкремневой керамики в среде СОЖ // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 40(59). С. 144—154.

Об авторе:

Душко Олег Викторович — канд. техн. наук, доц., директор Института дистанционного обучения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, ovd28@mail.ru

O. V. Dushko

HYDRODYNAMIC ANALYSIS OF CONDITIONS OF DISPERSION OF SILICON CARBONATE CERAMICS IN CUTTING LUBRICANT

Processes of abrasive processing of highly rigid ceramic materials without using special cutting lubricants (CL) leads to the failure of expensive abrasive tool and to the destruction of a surface layer of the product. The paper deals with the interaction processes of CL with the surfaces of the product and the tool and some recommendations concerning the selection of effective composition of liquid for the surface of the detail to receive the specified quality at the optimum modes of processing are given.

Key words: highly rigid ceramics, diamond grinding, diamond processing, lubricant cooling liquid, dispersion of the material, super finish grinding of ceramics.

REFERENCES

1. Dushko O. V., Shumyacher V. M. *Almaznoe shlifovanie karbidkremnievoi keramiki dlya mashinostroeniya* [Diamond grinding of silicon carbide ceramics for machine engineering]. Volgograd, VSUACE Publ., 2009. 80 p.

2. Dushko O. V., Shumyacher V. M. More efficient diamond grinding of superhard ceramics. *Russian Engineering Research*, 2011, 31(6), pp. 619—622.

3. Lyckfeldt O., Ferreira J. M. F. Processing of porous ceramics by starch consolidation. *Journal of the European Ceramic Society*, 1998, 18(2), pp. 131—140.

4. Dushko O. V. [Influence of lubricating-cooling fluid composition on final polishing process of highly rigid ceramic materials]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2011, iss. 25(44), pp. 171—177.

5. Dushko O. V., Shumyacher V. M., Bashkirtseva I. V. [Dynamics of contact interaction between a tool and a detail at abrasive dispersion]. *Abrazivnoe proizvodstvo : sb. nauch. tr.* [Abrasive production: Proceedings]. Chelyabinsk, SUrSU Publ., 2005. Pp. 131—138.
6. Sepulveda P., Binner J. G. P. Processing of cellular ceramics by foaming and in situ polymerisation of organic monomers. *Journal of the European Ceramic Society*, 1999, 19(12), pp. 2059—2066.
7. Kear B. H., Colaizzi J., Mayo W. E., Liao S. C. On the processing of nanocrystalline and nanocomposite ceramics. *Scripta Materialia*, 2001, 44(8-9), pp. 2065—2068.
8. George A. Graves, Allan Lightman, Gyoowan Han, Akos Bezeredi, Stan Rodrigues. Development of a curved layer lom process for monolithic ceramics and ceramic matrix composites. *Rapid Prototyping Journal*, 1999, 5(2), pp. 61—71.
9. Shumyacher V. M. [Forecasting of working capacity of grinding materials in abrasive processing]. *Materialy i tekhnologii XXI veka : sb. st. III Mezhdunar. nauch.-tekh. konf.* [Materials and technologies of XXI century. Proc. III Int. Conf.]. Penza, Privolzhskii Dom Znanii Publ., 2005. Pp. 90—92.
10. Dushko O. V., Shumyacher V. M., Bashkirtseva I. V. [Mathematical model of the process of abrasive dispersion of metal]. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Technology of machine engineering], 2005, no. 12, pp. 46—50.
11. Shumyacher V. M., Dushko O. V., Bashkirtseva I. V. [Research of the impact of lubricant cooling liquid on the wear of abrading blocks and the quality of the processed surface]. *Sb. nauch. tr. XXV Rossiiskoi shkoly po problemam nauki i tekhnologii* [Proc. XXV Russian School on Problems of Science and Technologies]. Ekaterinburg, UD RAS Publ., 2005. Pp. 212—214.
12. Ma J., Tan G. E. B. Processing and characterization of metal-ceramics functionally gradient materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 113(1-3), pp. 446—449.
13. Dushko O. V. [Assessment of thickness of a defective layer of highly rigid ceramics at diamond grinding]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [News of Volgograd State Technical University], 2013, vol. 9, no. 7 (110), pp. 19—21.
14. Poosanaas P., Dogan A., Prasadarao A. V., Komarneni S., Uchino K. Effect of ceramic processing methods on photostrictive ceramics. *Advanced Performance Materials*, 1999, 6(1), pp. 57—69.
15. Tulyaganov D. U., Tukhtaev M. E., Escalante J. I., Ribeiro M. J., Labrincha J. A. Processing of cordierite based ceramics from alkaline-earth-aluminosilicate glass, kaolin, alumina and agnesite. *Journal of the European Ceramic Society*, 2002, 22(11), pp. 1775—1782.
16. Kragelskii I. V., Dobychin M. N., Kombalov V. S. *Osnovy raschetov na trenie i iznos* [Principals of calculations on friction and wear]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 380 p.
17. Dushko O. V., Shumyacher V. M. [Increase of efficiency of diamond grinding of highly rigid ceramic materials]. *Stanki i instrument* [Machines and tools], 2011, no. 3, pp. 32—37.

For citation:

Dushko O. V. [Hydrodynamic analysis of conditions of dispersion of silicon carbonate ceramics in cutting lubricant]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 40(59), pp. 144—154.

About author:

Dushko Oleg Viktorovich — Candidate of Engineering Science, Docent, Director of Distance Education Institute, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, ovd28@mail.ru

УДК 621.922:691.42/.43

О. В. Душко

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОСИЛОВЫХ НАГРУЗОК НА ОБРАЗОВАНИЕ ТРЕЩИН ПРИ ОБРАБОТКЕ ВЫСОКОТВЕРДОЙ КЕРАМИКИ

В результате механической обработки керамики возникающие в зоне контакта заготовки и инструмента термосиловые нагрузки могут приводить к возникновению различных дефектов на поверхности детали. Предлагается методика расчета температурных нагрузок и напряжений на поверхности изделий из высокотвердой керамики, позволяющая прогнозировать получение поверхности заданного качества.

К л ю ч е в ы е с л о в а: высокотвердая керамика, шлифование, сила резания, контактная температура, контактное напряжение, трещины, шлифовальный круг.

Механическая обработка керамики (шлифование и полирование) является весьма ответственным технологическим процессом, сопровождающимся большими теплосиловыми нагрузками в зоне контакта инструмента с заготовкой, что приводит к образованию микротрещин различных форм и направлений [1]. Как показывает практика, трещины могут возникнуть не только в процессе шлифования, но и через некоторое, довольно длительное время, которое иногда может составлять несколько суток [2]. Таким образом, можно заключить, что этот процесс является неуправляемым и воздействовать на него можно только частично, например снижением шероховатости, глубиной и скоростью обработки, подбором шлифовальных кругов и т. д. [1, 3].

Исследователи считают, что основной причиной образования трещин является повышенный нагрев обрабатываемой поверхности и остаточные напряжения на шлифуемом материале [4—6].

Что касается температурного воздействия, то его можно определить через общую тепловую мощность N , Вт, выделенную в зоне контакта шлифовального круга с заготовкой. Для этого необходимо знать тангенциальную силу шлифования P_z , Н, и скорость круга ($V_{кр} = \frac{\pi n}{30} R$, м/с):

$$N = P_z V_{кр}. \quad (1)$$

Следует обратить внимание, что при теоретических исследованиях процесса шлифования карбидкремниевой керамики [7—9] нами выведена формула для поперечной (тангенциальной) составляющей силы резания P_z (2), Н, позволяющая определять тангенциальную силу шлифования при различных скоростях инструмента (рис. 1 и 2).

$$P_z = \frac{10^3 V_d \delta_{zi}^2 0,001 \rho B}{60 D_{кр} 0,01 C} (R-t) \left[\frac{\pi n_{кр}}{30} (R-t) \pm 2V_d \right] \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

где V_d — скорость детали; δ_{zi} — поперечный размер абразивного зерна, соответствующий определенному номеру структуры шлифовального круга (опре-

деляется по таблицам); ρ — объемный вес керамики; B — ширина круга; C — объемное содержание шлифовального материала в абразивном инструменте, зависящее от структуры круга (определяется по таблицам); $D_{кр}$ — диаметр круга; R — радиус круга; $n_{кр}$ — частота вращения круга; t — глубина шлифования.

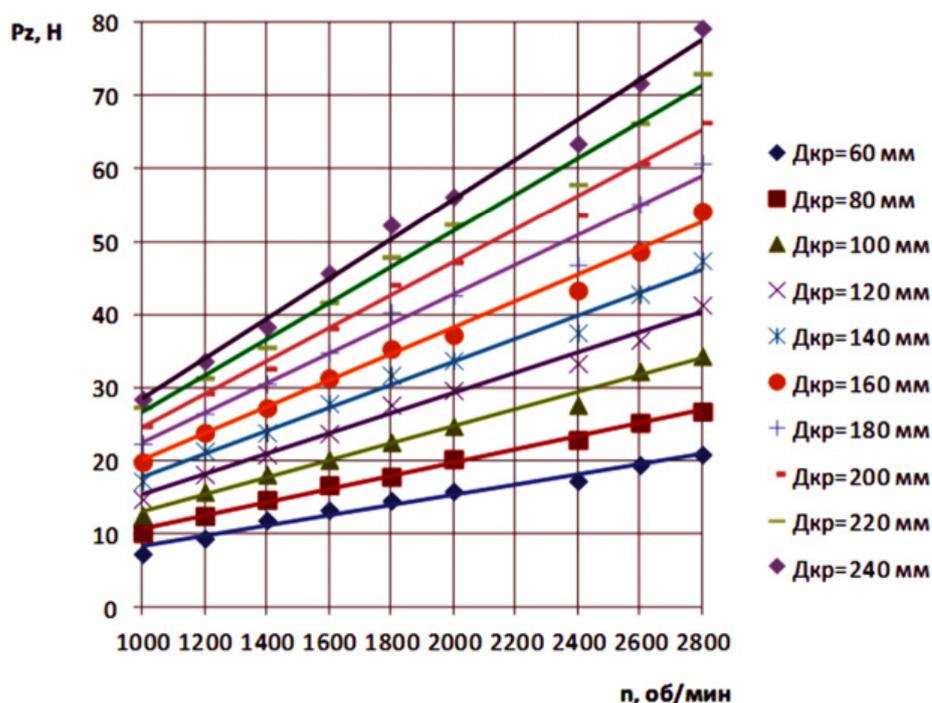


Рис. 1. Зависимость тангенциальной силы P_z от частоты вращения шлифовального круга

Разделив общую тепловую мощность, выделенную при сьеме стружки, на площадь зоны контакта шлифовального круга и заготовки F_{xz} [6], получим плотность теплового потока, Вт/м², или той нагрузки (тепловой), которая будет передаваться материалу и инструменту:

$$q = \frac{P_z V_{кр}}{F_{xz}}. \quad (3)$$

Для сталей установлено [10, 11], что примерно 80 % тепла при шлифовании переходит в деталь и лишь 15 % — в шлифовальный круг; остальные 2...5 % уходят со стружкой и охлаждающей жидкостью. Это можно объяснить тем, что тепло из зоны контакта «инструмент — заготовка», где снимается стружка и образуются трещины, поступает в охлаждающую жидкость не напрямую, а с уже нагретого образца, и поэтому тепловой поток распределяется в основном между участвующими в процессе шлифования инструментом и заготовкой.

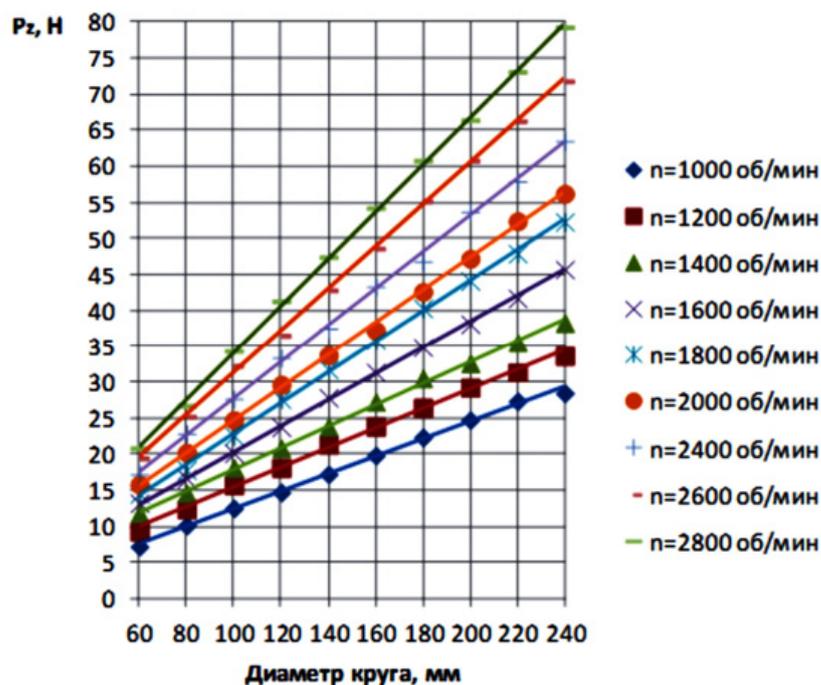


Рис. 2. Зависимость тангенциальной силы P_z от диаметра шлифовального круга

Если говорить о шлифовании высокотвердой карбидкремниевой керамики, то в известной нам литературе сведений о таком перераспределении тепла пока нет. Поэтому затраченные мощности и тепловые потоки, образуемые в процессе шлифования керамики, можно рассчитать с помощью предложенных формул (1), (2), (3) и теоретических графиков (см. рис. 1 и 2).

Известно, что один Ватт мощности, затраченный в одну секунду, есть Джоуль, представляющий собой единицу измерения теплоты, т. е.: $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{с} = 0,238 \text{ ккал}$ или $4,186 \text{ Дж} = 1 \text{ ккал}$.

По закону Фурье количество теплового потока Q пропорционально градиенту температуры T , т. е.:

$$\frac{dQ}{dT} = -cm, \quad (4)$$

где c — теплоемкость керамики, $\text{ккал}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$; m — масса нагреваемого материала, кг .

Из (4):

$$\int_{Q_0}^Q dQ = -cm \int_{T_0}^T dT.$$

Пренебрегая Q_0 и T_0 ввиду их малости, запишем: $Q = -cm$; знак « \leftarrow » показывает направление теплового потока, тогда: $T = Q/cm$.

В табл. 1 представлены теоретические (мгновенные) значения температур в контакте шлифовального круга и заготовки, а на рис. 3 — графики зависимости температуры от числа оборотов круга и его диаметра.

Теоретические (мгновенные) значения температуры
в контакте шлифовального круга и заготовки

D круга, мм	T, °C, при n, об/мин						
	1000	1400	1600	1800	2000	2400	2600
80	123	217	279	350	447	540	613
100	172	325	440	575	724	916	1060
120	230	416	610	776	990	1248	1480
140	305	618	805	1015	1265	1610	1858
160	391	825	1036	1295	1665	2140	2352
180	507	1025	1355	1720	2056	2677	3070
200	602	1265	1716	2030	2530	3160	3530
220	716	1454	1849	2335	2675	3455	3885
240	910	1747	2214	2713	3210	4020	4510

Из приведенных данных видно (см. табл. 1), что теоретически температура в контакте может принимать значения от 123 °C и достигать значений температуры начала размягчения керамики (>1400 °C).

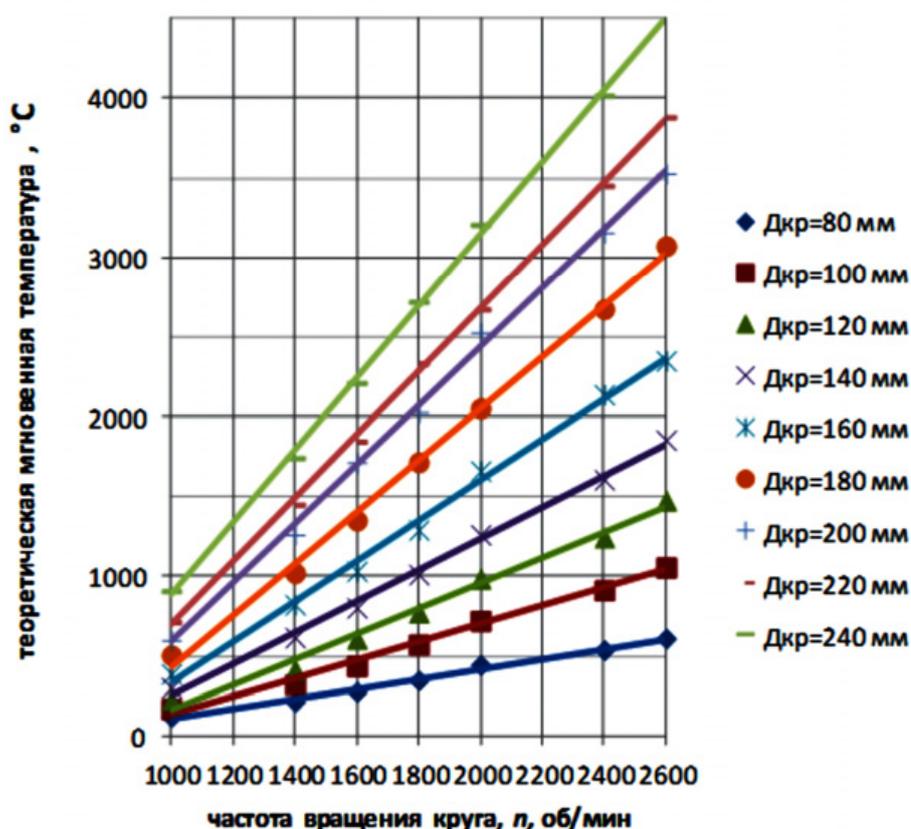


Рис. 3. Зависимость теоретической (мгновенной) температуры в контакте «инструмент — деталь» от частоты вращения абразивного круга

Тепловая напряженность шлифуемого материала определяется исходя из условий трещиностойкости заготовки при предполагаемой нами максимальной температуре 1400 °С (см. табл. 1). На основании полученных результатов расчетов были получены данные для количества теплоты, образуемого при обработке высокотвердой керамики (табл. 2 и рис. 4). Видно, что значения количества теплоты могут меняться от 12 до 927 Кал (табл. 2) в зависимости от условий шлифования. Если учесть, что СОЖ отводит около 10 % тепла, то температура детали, рассчитанная по формуле $T = Q/ct$, должна быть порядка 900 °С.

Таблица 2

Количество теплоты в зоне контакта абразивного зерна с поверхностью заготовки, Вт

Частота вращения круга, об/мин	$D_{кр}$, мм								
	80	100	120	140	160	180	200	220	240
1000	12,2	16,8	22,4	29,6	38,3	49,3	58,5	74	86,7
1400	19,4	33,6	44,2	62,4	82,6	103,5	136,6	181,7	219,7
1600	27,8	42,3	57,6	86,5	115,6	142,3	185,2	240,6	271,4
1800	34,6	51,2	75,3	110,6	142,2	175,4	220,3	282,8	322,6
2000	38,7	62,3	90,6	131,6	175,3	207,8	273,6	336,7	397,2
2400	57,4	89,7	121,6	176,4	229,4	279,5	353,4	453,6	510,8
2600	59,6	97,3	141,3	201,6	258,6	318,8	398,7	502,3	573,6
2800	72,5	108,6	159,7	224,2	288,3	357,5	453,4	544,8	627,3

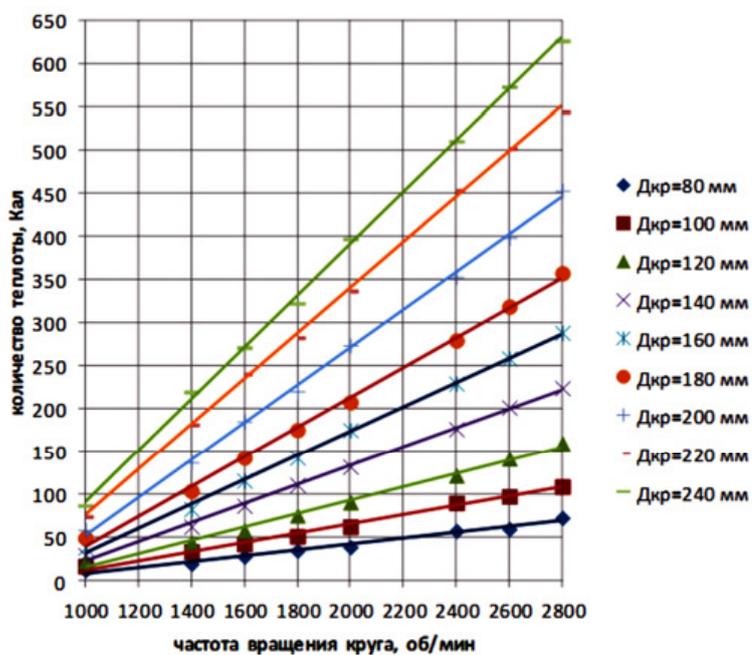


Рис. 4. Зависимость теоретического количества теплоты в контакте «инструмент — деталь» от частоты вращения абразивного круга

Для механической обработки высокотвердой керамики методик и ориентиров, позволяющих прогнозировать начало появления трещин, пока нет. Нами за такой ориентир принята температура размягчения материала. По теории Дебая [12], существует температурная граница (температура Дебая), выше которой в твердом теле средняя энергия атомов с ростом температуры растет, и начинается интенсивное изменение кристаллической решетки («последебаевские» температуры).

В наших исследованиях этот период можно принять за начало размягчения керамики и появления трещин при температурных воздействиях на шлифуемый материал. Анализируя диаграмму состояния муллито-корундовой керамики с содержанием 50...95 % Al_2O_3 , технологию получения первичного и вторичного муллита [13], опираясь на справочную литературу [14], предлагаем из интервала температур размягчения керамики (1500...1800 °С) для расчетов принять температуру 1400 °С и считать ее температурой начала размягчения керамики («температура появления трещин»). В настоящей работе эта температура учтена при анализе табл. 1. Видно, что соотношение числа оборотов шпинделя и диаметра шлифовального круга ограничивается мгновенной температурой размягчения керамики, равной примерно 1400 °С. Таким образом, при шлифовании карбидкремниевой керамики в пределах « T° — n , об/мин — $D_{кр}$, мм» определяется область трещиностойкости и область зарождения и развития трещин (см. табл. 1).

Например, при обработке керамики кругом диаметром 160 мм при скоростях 1800 об/мин поверхность шлифования должна быть бессколовой, а при увеличении числа оборотов до 2000 об/мин следует ожидать появления трещин. Считаем, чем больше скорость микрорезания при шлифовании, тем большая часть механической работы, совершаемой абразивным зерном, переходит в теплоту. При этом мгновенная температура в зоне контакта инструмента с заготовкой является самой высокой и может достигать значений температуры плавления керамики.

Второй причиной трещинообразования может быть вертикальное силовое воздействие инструмента на поверхность шлифуемого материала, что должно вызывать нормальные напряжения в приповерхностных слоях керамики [15]. Критерием появления трещин в этом случае будут допустимые напряжения на сжатие материала, то есть моменты, когда несущая способность обрабатываемой заготовки исчерпана и материал переходит в фазу текучести. Если в процессе шлифования нормальные напряжения σ_y окажутся больше или даже равными допустимым напряжениям на сжатие $\sigma_{сж}$, то можно утверждать, что этот период и есть момент зарождения, а затем и дальнейшего распространения трещин.

Для теоретической оценки механического воздействия абразивного зерна на поверхность шлифования необходимо знать вертикальную составляющую силы резания P_y , которая и вызывает напряжения сжатия — $\sigma_{сж}$. Определение силы P_y рассмотрено в [7].

Напряжение сжатия от единичного зерна:

$$\sigma_i = \frac{P_{yi}}{F_{\text{зерна}}}. \quad (5)$$

Здесь $F_{i \text{ зерна}}$ — площадь поверхности абразивного зерна, находящегося в контакте с обрабатываемой заготовкой. Площадь F , на которую действует в данный момент вертикальная сила P_y , можно определить как произведение толщины стружки на поперечное сечение зерна с учетом того, что в процессе шлифования одновременно участвуют несколько зерен, число которых определяется из объемного содержания шлифовального материала и диаметра круга, т. е. напряжения сжатия определяются как $\sigma = P_y/F$.

В табл. 3 и 4 представлены значения теоретических напряжений сжатия в приповерхностных слоях шлифуемой керамики и вертикальной составляющей силы резания в зависимости от диаметра шлифовального круга, частоты его вращения, а на рис. 5—7 — графики, построенные по этим данным.

Таблица 3

Теоретические значения напряжений сжатия в приповерхностных слоях керамики

D кру- га, мм	σ, МПа, при n, об/мин								
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2400	2600	2800
60	259	335	422	495	570	640	775	825	905
80	467	555	638	714	775	855	977	1105	1147
100	552	637	725	810	910	990	1150	1255	1350
120	595	690	825	930	1125	1155	1350	1445	1575
140	695	830	965	1105	1275	1400	1645	1772	1955
160	765	925	1115	1275	1435	1590	1845	2000	2210
180	855	1025	1220	1425	1595	1750	2125	2257	2475
200	935	1130	1305	1560	1690	1935	2265	2450	2675
220	1150	1290	1510	1700	1950	2167	2545	2762	2975
240	1255	1460	1683	1922	2195	2385	2777	3010	3250

Таблица 4

Теоретические значения вертикальной составляющей силы резания P_y

D кру- га, мм	P_y , Н, при n, об/мин								
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2400	2600	2800
60	10,4	13,2	16,3	19,6	23,2	25,7	31,3	34,3	36,8
80	18,7	21,2	24,3	26,8	30,6	33,6	39,4	42,5	45,9
100	22,1	24,5	28,6	31,5	35,6	39,5	47,6	51,0	54,4
120	23,8	28,5	32,5	36,8	41,2	45,6	54,3	58,3	63,0
140	27,2	34,0	39,0	44,2	50,3	55,8	66,3	71,8	78,2
160	31,6	39,0	45,3	51,0	57,8	64,6	75,6	82,4	88,4
180	37,4	42,7	50,0	56,8	63,5	70,4	84,3	92,3	99,0
200	38,1	45,3	53,7	62,9	71,4	78,2	93,4	102,0	110,5
220	44,5	51,0	59,5	68,3	76,2	84,4	102,3	110,5	119,0
240	50,2	58,3	68,6	77,5	87,3	96,7	116,4	126,5	136,0

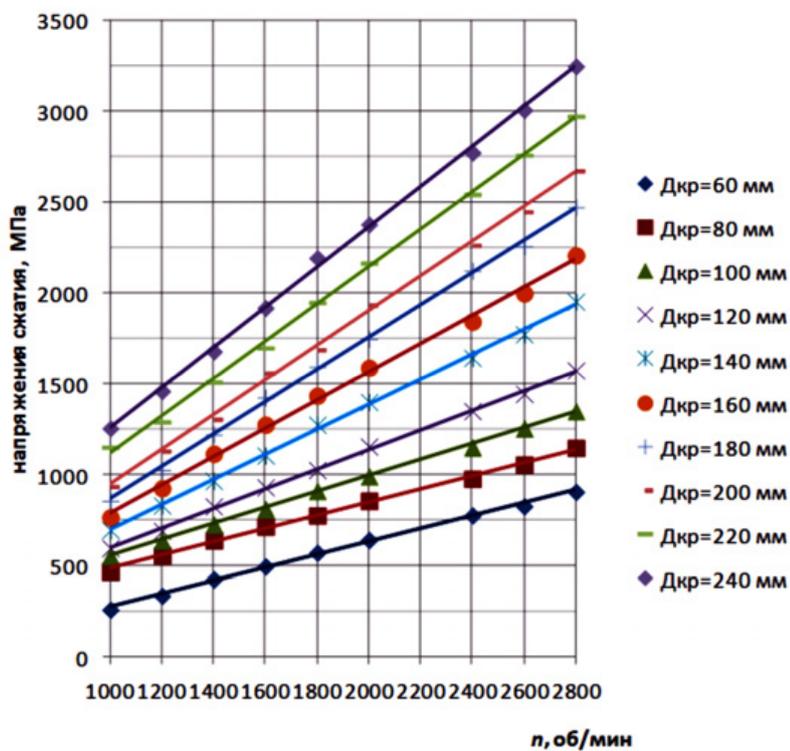


Рис. 5. Зависимость напряжения на поверхности керамики от частоты вращения круга

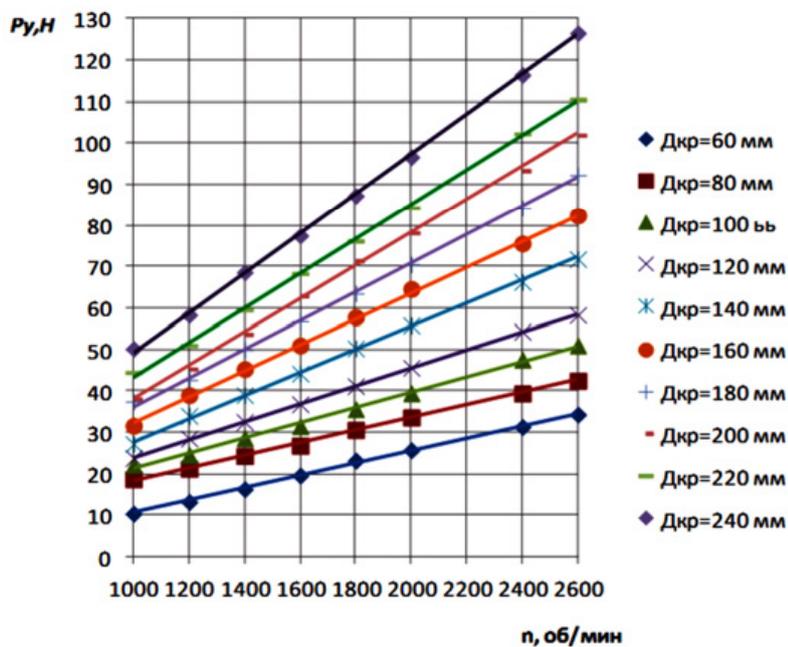


Рис. 6. Зависимость составляющей P_y силы резания от частоты вращения шлифовального круга

Анализ таблиц и графиков показывает, что при увеличении диаметра шлифовального круга и частоты его вращения, то есть при увеличении скорости шлифования, нормальные напряжения в зоне контакта инструмента и заготовки растут до значений более 3000 МПа [16]. Это совпадает с пределом прочности керамики на сжатие [17, 18], и поэтому вполне возможно появление трещин.

Таким образом, для гарантированного шлифования керамики без трещин необходимо, чтобы нормальные напряжения, возникающие при шлифовании, были значительно меньше установленных пределов прочности керамики на сжатие. Такой гарантией может быть некий «запас прочности», который на основании проведенных экспериментальных исследований предлагаем принять равным 1,5, или максимальные напряжения сжатия не должны превышать 2000 МПа (см. табл. 3) и значения вертикальной составляющей силы резания P_y при этом не должны быть более 82,4 Н (см. табл. 4).

Учитывая, что мгновенные температуры в зоне контакта абразивного зерна и заготовки могут достигать значений начала размягчения керамики и что они являются определяющими в процессе образования трещин на поверхности обрабатываемого материала, предложено, для получения поверхности изделия заданного качества, предельную температуру в контакте ограничить величиной 1400 °С.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Tönshoff H. K., Arendt C., Ben Amor R.* Cutting of Hardened Steel // CIRP Annals — Manufacturing Technology. Vol. 49. Iss. 2. Pp. 547—566.
2. Tribological behavior of Al_2O_3/ZrO_2-ZrO_2 laminated composites / A. Tarlazzi, E. Roncari, P. Pinasco, S. Guicciardi, C. Melandri, G. de Portu // Wear. 2000. Vol. 244. № 1-2. С. 29—40.
3. *Klocke F., Brinksmeier E., Weinert K.* Capability profile of hard cutting and grinding processes // CIRP Annals — Manufacturing Technology. 2005. Vol. 54. Iss. 2. Pp. 22—45.
4. *Сотова Е. С., Верецака А. С.* Градиентная керамика с нанодисперсным покрытием для широкой области применения // Мат. Международной науч.-технич. конф. ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ». С. 108—120.
5. *Wang J., Taleff E. M., Kovar D.* High-temperature deformation of $Al_2O_3/Y-TZP$ particulate composites // Acta Materialia. 2003. Т. 51. № 12. Pp. 3571—3583.
6. *Душко О. В., Проценко О. В.* Феноменологическая модель взаимодействия инструмента и заготовки при шлифовании карбидкремниевой керамики // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2014. Вып. 3 (34). Ст. 7. URL: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>
7. *Душко О. В., Проценко О. В.* Аналитическое определение поперечной силы резания при шлифовании керамики // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2014. Вып. 37(56). С. 139—142.
8. *Душко О. В., Мышлинская И. Х.* Повышение качества изделий из высокотвердой керамики для тяжело нагруженных пар трения // Надежность. 2014. № 3 (50). С. 62—66.
9. *Душко О. В., Шумячер В. М., Пушкарев О. И.* Установка для оценки эффективности процессов алмазно-абразивной обработки материалов доводочными брусками // СТИН. 2011. № 4. С. 38—40.
10. *Резников А. Н.* Теплофизика резания. М.: Машиностроение, 1969. 288 с.
11. Metal machining theory and applications / T. Childs, K. MacKawa, T. Obikawa, Y. Yamane. New York: Wiley, 2000. 408 p.
12. *Debye P.* Zur Theorie der spezifischen Warmen // Ann. Phys. 1912. Bd. 30. S. 789.
13. *Юшкевич М. О., Розовой М. И.* Технология керамики. М., 1969. 350 с.
14. *Коленко Е. А.* Технология лабораторного эксперимента: Справочник. СПб.: Политехника, 1994. 751 с.

15. Душко О. В. Пути снижения толщины дефектного слоя на поверхности высокотвердых керамических материалов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2011. Вып. 25 (44). С. 163—170.

16. Lauwers B., Kruth J.-P., Brans K. Development of technology and strategies for the machining of ceramic components by sinking and milling EDM // Annals of the CIRP. 2007. 56(1). Pp. 225—228.

17. Машиностроительная керамика / А. П. Гаршин, В. М. Гропянов, Г. П. Зайцев, С. С. Семенов. СПб: С.-Петерб. гос. техн. ун-т, 1997. 725 с.

18. Семченко Г. Д. Конструкционная керамика и огнеупоры. Харьков: Штрих, 2000. 304 с.

© Душко О. В., 2015

Поступила в редакцию
в марте 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Душко О. В. Влияние термосиловых нагрузок на образование трещин при обработке высокотвердой керамики // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 40(59). С. 155—165.

Об авторе:

Душко Олег Викторович — канд. техн. наук, доц., директор Института дистанционного обучения, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, ovd28@mail.ru

O. V. Dushko

INFLUENCE OF THERMAL POWER LOADS ON CRACKING WHEN PROCESSING HIGHLY RIGID CERAMICS

Thermal power loads which arise in the zone of contact between raw material and tool as a result of mechanical processing of ceramics can lead to different defects on the detail's surface. Calculation method for temperature loads and tension on the surface of products made of highly rigid ceramics allowing to predict the receiving of the surface of the specified quality is offered in the article.

Key words: highly rigid ceramics, grinding, cutting force, contact temperature, contact tension, cracks, grinding wheel.

REFERENCES

1. Tönshoff H. K., Arendt C., Ben Amor R. Cutting of Hardened Steel. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 49(2), pp. 547—566.

2. Tarlazzi A., Roncari E., Pinasco P., Guicciardi S., Melandri C., de Portu G. Tribological behavior of Al_2O_3/ZrO_2-ZrO_2 laminated composites. *Wear*, 2000, 244(1-2), pp. 29—40.

3. Klocke F., Brinksmeier E., Weinert K. Capability profile of hard cutting and grinding processes. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2005, 54(2), pp. 22—45.

4. Sotova E. S., Vereshchaka A. S. [Gradient ceramics with a nanodisperse covering for a wide functional area]. *Mat. Mezhdunarodnoi nauch.-tekhnich. konf. AAI «Avtomobile- i traktorostroenie v Rossii: priority razvitiya i podgotovka kadrov», posvyashchennoi 145-letiyu MGTU «MAMI»* [«Machine- and tractor engineering in Russia: priorities of development and training». Proc. Int. Conf.]. Pp. 108—120.

5. Wang J., Taleff E. M., Kovar D. High-temperature deformation of $Al_2O_3/Y-TZP$ particulate composites. *Acta Materialia*, 2003, 51(12), pp. 3571—3583.

6. Dushko O. V., Protsenko O. V. [Phenomenological model of interaction of a tool and a workpiece when grinding silicon-carbide ceramics]. *Internet-Vestnik VolgGASU*, 2014, no. 3(34), paper 7. URL: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>

7. Dushko O. V., Protsenko O. V. [Analytical determination of transverse cutting force at ceramics grinding]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturo-stroitel'nogo universiteta*.

Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2014, iss. 37(56), pp. 139—142.

8. Dushko O. V., Mishlinskaya I. Kh. [Quality improvement of products made of highly rigid ceramics for heavy-loaded friction pairs]. *Dependability*, 2014, 3(50), pp. 62—66.

9. Dushko O. V., Shumyacher V. M., Pushkarev O. I. [Installation for the assessment of efficiency of processes of diamond and abrasive processing of materials by abrading blocks]. *STIN* [Machines Tools], 2011, no. 4, pp. 38—40.

10. Reznikov A. N. *Teplofizika rezaniya* [Thermal physics of cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 288 p.

11. Childs T., MacKawa K., Obikawa T., Yamane Y. *Metal machining theory and applications*. New York, Wiley, 2000. 408 p.

12. Debye P. Zur Theorie der spezifischen Warmen. *Ann. Phys.*, 1912, Bd. 30, S. 789.

13. Yushkevich M. O., Rogovoi M. I. *Tekhnologiya keramiki* [Ceramics technique]. Moscow, 1969. 350 p.

14. Kolenko E. A. *Tekhnologiya laboratornogo eksperimenta: Spravochnik* [Technique of laboratory experiment. Reference book]. Saint-Petersburg, Politekhnik Publ., 1994. 751 p.

15. Dushko O. V. [Reduction methods of defective layer depth on highly rigid ceramic materials surface]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2011, no. 25 (44), pp. 163—170.

16. Lauwers B., Kruth J.-P., Brans K. Development of technology and strategies for the machining of ceramic components by sinking and milling EDM. *Annals of the CIRP*, 2007, 56(1), pp. 225—228.

17. Garshin A. P., Gropyanov V. M., Zaitsev G. P., Semenov S. S. *Mashinostroitel'naya keramika* [Engineering ceramics]. Saint-Petersburg, SPbSTU Publ., 1997. 725 p.

18. Semchenko G. D. *Konstruktivnaya keramika i ognepopy* [Structural ceramics and refractories]. Kharkov, Shtrikh Publ., 2000. 304 p.

For citation:

Dushko O. V. [Influence of thermal power loads on cracking when processing highly rigid ceramics]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 40(59), pp. 155—165.

About author:

Dushko Oleg Viktorovich — Candidate of Engineering Science, Docent, Director of Distance Education Institute, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, ovd28@mail.ru

УДК 621.791.92.669

В. А. Луговая, В. В. Ярошик

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

ОСОБЕННОСТИ НАПЛАВКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ СПЛАВОВ ПРИ УПРОЧНЕНИИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ

Разработан способ упрочнения рабочих поверхностей тел вращения электрошлаковой наплавкой композиционных материалов неплавящимся электродом с подачей порошкообразных легирующих компонентов в сварочную ванну. Изучены физико-механические свойства исследуемых материалов, показана эффективность их использования.

Ключевые слова: композиционные материалы, состав, электрошлаковая наплавка, структура, износостойкость.

Известен способ упрочнения тел вращения электрошлаковой наплавкой плавящимся электродом в виде сварочной проволоки Св.08-1 с добавкой износостойких компонентов в сварочную ванну [1—3]. При таком способе упрочнения наплавляемый материал сильно разбавлен металлом плавящейся электродной проволоки.

В обзоре [4] рассматривается дуговая наплавка трубчатым электродом, содержащим армирующие частицы карбидов вольфрама. Показано, что при этом происходит интенсивное растворение армирующих частиц, приводящее к резкому снижению твердости.

Известен способ наплавки износостойких композиций — дуговая наплавка с засыпкой армирующих частиц в хвост сварочной ванны. Возможны различные варианты этого процесса: плавящимся и неплавящимся электродом [5], в аргоне или смеси аргона и гелия [6].

Поиск новых высокопроизводительных способов наплавки композиционными сплавами связан с разработкой методов, при которых имеет место минимальное растворение тугоплавких соединений: использование неплавящегося электрода [5], порошковых лент и проволок [7], наплавка плазменной дугой, создающей на упрочняемой поверхности сварочную ванну, в которую подаются зерна упрочняющих фаз [8], различные способы электрошлаковой наплавки: жидким присадочным металлом [9], с использованием для электрошлакового нагрева неплавящихся электродов.

В данном исследовании применялся способ электрошлаковой наплавки с использованием неплавящегося графитового электрода. При использовании неплавящегося электрода образуются износостойкие поверхностные слои, практически полностью состоящие из наплавляемого материала, с минимальным разбавлением их металлом наплавляемой детали и электрода. Такие слои обладают более высокой твердостью, и их получение может быть дополнительным резервом повышения долговечности изделий.

Наплавка образцов в виде тел вращения производилась на специальной установке на базе сварочного автомата У-653 графитовыми электродами. Ток — постоянный прямой полярности, сила тока 600 А. Для получения шлаковой ванны использовался флюс АН-20, который расплавлялся в специальном водоохлаждаемом тигле.

В зависимости от геометрических размеров наплавляемого слоя скорость подачи порошкообразной наплавочной композиции регулировалась дозатором подачи, скорость вращения детали 0,05 об/мин.

Схема установки для наплавки тел вращения приведена на рис. 1.

Установка состоит из станины 1, на которую установлена коробка скоростей 2, передающая вращение манипулятору 3 и коробке передач 4.

Манипулятор имеет консольно вынесенный шпиндель, на котором в токарном патроне на оси закреплена деталь.

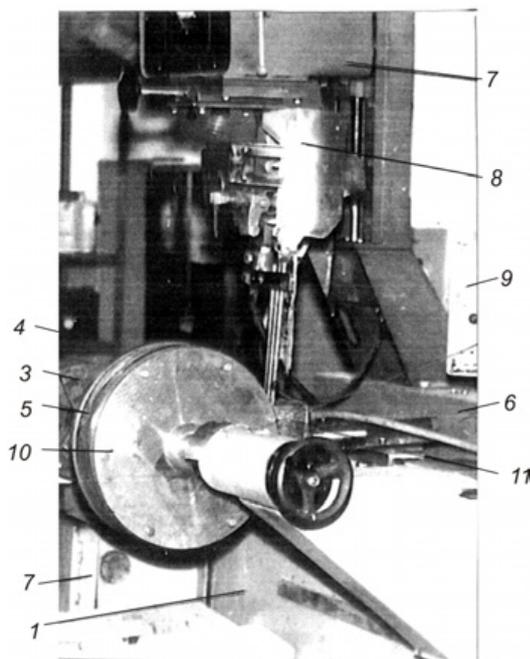


Рис. 1. Установка для наплавки тел вращения на базе сварочного автомата У-653

На задней стороне станины укрепляется верхняя и нижняя направляющие, по которым на роликах перемещается каретка 6. К каретке сверху укрепляется наплавочный автомат 7. На каретке также укреплен пульт управления станком 9. Подготовленная для наплавки деталь 5 зажимается двумя прижимными медными дисками 10. К прижимным дискам демпфирующим механизмом подводится водоохлаждаемая форма 11, которая одновременно является и кристаллизатором наплавляемого металла. Пространство, ограниченное ободом детали, габаритными дисками и формой, образует наплавочную ванну, где происходит электрошлаковый процесс. В указанное пространство заливают расплавленный флюс АН-20 и вводят графитовые электроды. Подача присадочного материала осуществляется дозатором 8, имеющим плавную регулировку подачи порошка. Расплавленный присадочный материал оседает вниз и формируется кристаллизатором. Флюс расплавляли в специальном водоохлаждаемом тигле.

При разработке состава наплавочной смеси были приняты во внимание результаты имеющихся исследований по влиянию структуры и внешних условий трения на износостойкость сталей разного класса, а также данные ис-

следований по изменению свойств наплавочных хромистых сплавов при дополнительном их легировании бором, титаном, никелем [9—15].

Состав для наплавки выбирался из промышленно освоенных, недорогих и недефицитных материалов. В качестве наплавочных материалов были выбраны:

- а) сормайт ПГ-1С (У30Х28Н4С4);
- б) порошок карбида титана TiC;
- в) порошок двойного диборида титана хрома (Ti, Cr)B₂;
- г) наплавочная смесь для плазменного напыления марки ПН70Х17Н4С4 для улучшения условий смачивания.

Состав исследуемых наплавочных композиций приведен в табл. 1.

Таблица 1

Состав наплавочных смесей

Условный номер наплавки	Состав, % вес			
	Сормайт ПГ-1С (У30Х28Н4С4)	Порошок		
		TiC	(Ti, Cr)B ₂	ПН70Х17Н4С4
1	100	—	—	—
2	50	35	10	5
3	50	25	20	5
4	50	25	25	—

Средние значения макро- и микротвердости наплавленных слоев и их фазовый состав приведены в табл. 2.

Исследование структуры и фазового состава наплавленных слоев проводили металлографическим, рентгеноструктурными методами с использованием металлографического светового микроскопа МИМ-8, рентгеновского дифрактометра Дрон-2. Микротвердость структурных составляющих измеряли по стандартной методике на микротвердомере ПМП-3.

Таблица 2

Фазовый состав и значения твердости наплавленных слоев

Условный номер наплавки	Твердость НРА	Микротвердость			Фазовый состав
		светлой фазы	темной фазы	в зоне сплавления	
1	62...64	4430	5300	2200	α-Fe, γ-Fe, (Cr, Fe) ₂₃ C ₆
2	70...72	4620	7200	2360	α-Fe, TiC, (Cr, Fe) ₂₃ C ₆ , (Ti, Cr) ₂ B ₅
3	72...74	4060	9830	2400	α-Fe, γ-Fe, TiC, (Ti, Cr)B ₂ , (Ti, Cr) ₂ B ₅
4	78...80	4680	9950	2480	α-Fe, TiC, (Ti, Cr)B ₂ , (Ti, Cr) ₂ B ₅ , (Ti, Cr, Fe) ₂₃ (C, B) ₆

Прогнозировать пригодность наплавки для работы в конкретных условиях эксплуатации можно по результатам испытаний механических свойств. Учитывая это, были определены основные параметры наплавленных слоев: предел прочности при растяжении, сжатии, тангенциальное усилие и ширина царапания, макро- и микротвердость.

Наплавки с наиболее высокими параметрами механических свойств были испытаны на абразивное и газоабразивное изнашивание, в качестве эталона использовалась наплавка промышленным сплавом сормайт ПГ-1С (состав 1).

Результаты проведенных исследований показали, что при всех видах абразивного изнашивания наиболее высокую стойкость имеют слои на основе следующей композиции:

25 % TiC + 25 % (Ti, Cr)B₂ + 50 % сормайт ПГ-1С. Химический состав наплавленного металла: C = 3,6 %; Ti = 14,3 %; Cr = 44,7 %; B = 8,3 %.

По сравнению с промышленным наплавочным сплавом сормайт ПГ-1С наплавленные слои данного состава имеют:

при абразивном изнашивании повышение износостойкости в 2...2,5 раза;

при испытании скоростной аэроабразивной струей под углом атаки 30° в 8...10 раз, а под углом атаки 90° — в 5...8 раз износостойкость выше, чем у эталонного образца.

Микроструктурные исследования и рентгеноструктурный анализ показали, что свойства наплавленных слоев зависят прежде всего от характера распределения легирующих компонентов между твердым раствором, карбидами, боридами и их расположения в микроструктуре.

Металлографическим анализом было установлено, что структурообразование в карбидно-боридных покрытиях происходит иначе, чем в обычных сплавах на железной основе. Тугоплавкие карбиды и бориды не расплавляются, а растворяются в жидкой связующей фазе или остаются без изменений в виде локальных включений. При одновременном легировании карбидами и боридами образуются структуры с дисперсным строением карбоборидных составляющих, расположенных в прочной цементирующей связке.

Матрично-армированную структуру имеют все карбидно-боридные наплавки (составы 2—4). На рис. 2 представлена микроструктура слоя, образованного композицией 50 % сормайт 1 + 25 % TiC + 25 % (Ti, Cr)B₂, которая показала наилучшую износостойкость.

Наружный наплавленный слой состоит из мелкозернистых кристаллов тугоплавких соединений, равномерно расположенных в прочной и сравнительно пластичной цементирующей светлой связке. Тугоплавкая фаза состоит из первичных карбидов TiC, карбоборидов (Ti, Cr)B₂ и сложных карбоборидов (Ti, Cr, Fe)₂₃(C,B)₆, (Ti, Cr)₂B₅, образованных в результате дисперсионного твердения цементирующей фазы.

Об этом свидетельствуют электронно-микроскопические исследования. Как следует из рис. 2, б, карбоборидные фазы типа (Ti, Cr, Fe)₂₃(C,B)₆ и (Ti, Cr)₂B₅ имеют форму каркаса скелета, в промежутках которого располагается аустенито-мартенситная связующая фаза. Такие бориды уменьшают хрупкость и способствуют получению слоев высокой износостойкости.

Тугоплавкая фаза занимает 50...60 % объема при полном отсутствии эвтектики. Основу наплавки образует аустенито-мартенситная светлая составляющая.

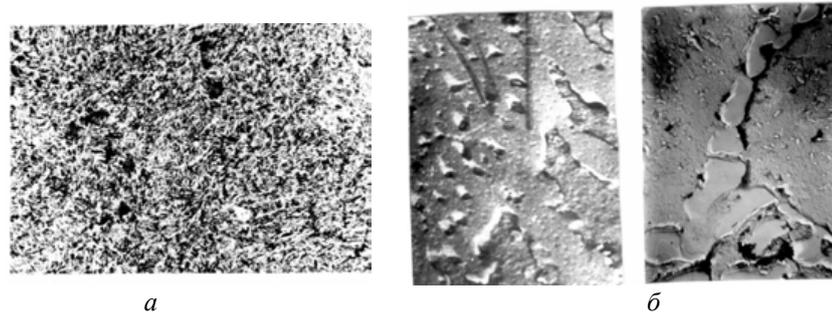


Рис. 2. Микроструктура слоя, наплавленного композицией 25 % TiC + 25 % (Ti, Cr)B₂ + 50 % сормайтa 1: *а* — наплавленный металл $\times 500$; *б* — наплавленный металл $\times 10\ 000$

При наплавке сормайтa-1 матрично-армированные структуры не образуются. Имеет место формирование структуры путем кристаллизации из расплава, состоящего из расплавленного сормайтa-1 с минимальным разбавлением его металлом наплавляемой детали. Формируемая таким образом микроструктура по толщине наплавки неоднородна, наблюдается постепенный переход от заэвтектической структуры на поверхности наплавки к доэвтектической по линии сплавления и изменение типа карбидов в сторону образования модификации с более низким содержанием углерода и хрома.

На рис. 3 приведена микроструктура слоя, наплавленного сормайтom-1.

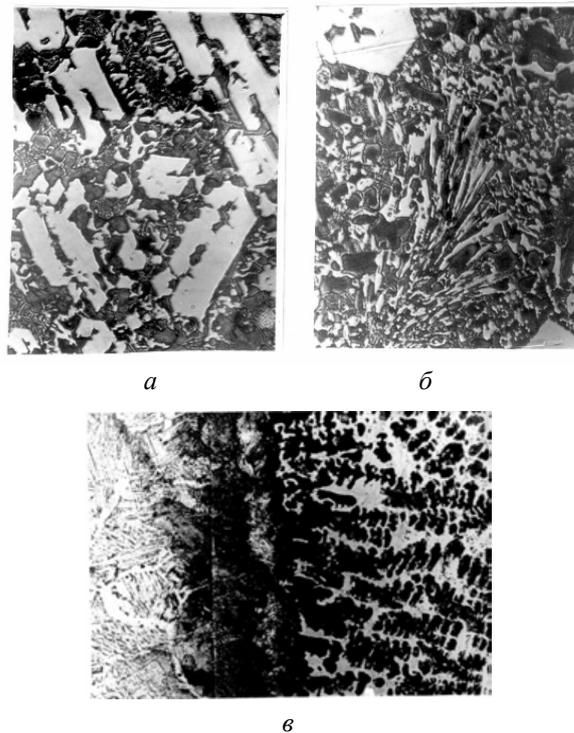


Рис. 3. Микроструктура слоя, наплавленного сормайтom-1 $\times 500$: *а* — поверхность наплавки; *б* — на расстоянии 2 мм от поверхности; *в* — на линии сплавления

Наружная заэвтектическая зона (рис. 3, а) состоит из первичных карбидов, имеющих гексагональную огранку и карбидную эвтектику ледебуритного типа.

Основным карбидом в заэвтектической зоне наплавленного слоя является соединение типа $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ и $(\text{Fe}, \text{Cr})_{23}(\text{C}, \text{B})_6$. Заэвтектическая зона занимает 50...60 % общей толщины. Микротвердость карбидов колеблется в пределах H_{100} — 13 500...16 900 МПа, а микротвердость эвтектики H_{100} — 6160...8450 МПа.

Доэвтектическая зона (рис. 3, в) характеризуется наличием дендритов твердого раствора (легированного аустенита) с осями 1 и 2 порядков и карбидной эвтектики, кристаллизующейся в междендритном пространстве.

Выводы:

1. Весь комплекс физико-механических свойств наплавленного слоя зависит от твердой тугоплавкой упрочняющей фазы и цементирующей связи.

2. Для получения покрытий с наиболее высокими эксплуатационными свойствами необходимо, чтобы тугоплавкие соединения давали слои, формирующиеся согласно схеме, когда тугоплавкий компонент лишь частично растворяется в связующем расплаве и образует матрично армированные структуры из фаз, когерентно связанных между собой.

3. Увеличение степени легирования, которое имеет место при использовании неплавящегося электрода при электрошлаковой наплавке взамен плавящегося, приводит к положительным изменениям свойств покрытий. Появляется возможность получение покрытий с заданным структурообразованием и высокой износостойкостью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Быстров В. А., Быстров А. В. Исследование свойств композиционных сплавов, наплавленных электрошлаковой наплавкой // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавочные материалы. Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1978. С. 98—102.

2. Ксендзык Г. В., Фрумин И. И., Кусков Ю. М. Электрошлаковая наплавка зернистым присадочным материалом // Теоретические и технологические основы наплавки. Новые процессы механизированной наплавки. Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1987. С. 89—95.

3. Дудко Д. А., Зеленин В. И., Нетеса И. В. Новые износостойкие композиционные сплавы. Износостойкие наплавочные материалы на основе тугоплавких соединений. Киев: Наукова думка, 1977. 187 с.

4. Howard A. Ferguson. Heat Treating of Powder Metallurgy Steels // ASM Handbook. Vol. 4: Heat treating. 2002. Pp. 229—237.

5. Опыт применения наплавки на предприятиях черной металлургии Украины / С. Я. Шехтер, В. В. Пьянков, Ю. Н. Лазаренко, Б. Е. Какошника // Наплавка. Опыт и эффективность применения. Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1995. С. 9—13.

6. Ole A. Sandven. Laser Surface Hardening // ASM Handbook. Volume 4: Heat treating. 2002. Pp. 286—297.

7. Hitesh Vasudev. Hardfaced layer on mild steel made by paste technique with smaw electrode to improve surface properties // International Journal of Advance research, Ideas and Innovations in technology. 2014. Vol. 1. Iss. 1. Oct. URL: <http://www.ijarit.com/manuscripts/m1p1/MIP1-1136.pdf>

8. Sinha P. K. Composite materials and structures. Published by Composite Centre of Excellence, AR & DB. Department of Aerospace Engineering I.I.T. Kharagpur. URL: http://www.ae.iitkgp.ernet.in/courses/AE40006%20-%20COMPOSITE%20STRUCTURES/PKS_COMPOSITE_part1.pdf

9. Стеренбоген Ю. А., Кулик В. М., Мусеев А. В. Некоторые технологические особенности электрошлаковой наплавки жидким присадочным металлом // Новые процессы наплавки, свойства наплавленного металла и переходной зоны / под ред. П. В. Гладкого. Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1984. С. 34—39.

10. Орешкин В. Д., Луговая В. А. Износостойкие композиционные карбоборидные покрытия // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Технические науки. 2001. Вып. 1(4). С. 119—122.

11. Износостойкие покрытия на основе карборидов титана на рабочие органы чугунных деталей / В. Д. Орешкин, В. А. Луговая, Е. Т. Лобанова, И. Г. Лукина // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2011. Вып. 21 (40). С. 110—114.

12. Борсодерживающие композиционные материалы для наплавки клапанов доменных печей / И. М. Спиридонова, Е. В. Суховая, Б. Ф. Бутенко, А. Н. Новодран // Наплавка при изготовлении деталей машин и оборудования. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1986. С. 34—40.

13. Пащенко М. А., Фрумин Е. И. Наплавка породоразрушающего бурового инструмента // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка в машиностроении и ремонте. Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1981. С. 65—75.

14. Луговая В. А., Лобанова Е. Т., Лукина И. Г. Высокоизносостойкие покрытия на основе нитридов и карборидов тугоплавких соединений // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2012. Вып. 27(46). С. 9—15.

15. Арисова В. Н., Орешкин В. Д., Луговая В. А. Структура покрытий на железоуглеродистых сплавах по усовершенствованной технологии электрошлаковой наплавки // Межвузовский сборник трудов ВГТУ. Волгоград, 2005. С. 30—34.

© Луговая В. А., Ярошик В. В., 2015

Поступила в редакцию
в феврале 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Луговая В. А., Ярошик В. В. Особенности наплавки композиционных сплавов при упрочнении рабочих поверхностей тел вращения // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 40(59). С. 166—173.

Об авторах:

Луговая Валентина Алексеевна — канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры морских нефтегазовых сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, rincom1T@yandex.ru

Ярошик Владимир Викторович — доцент кафедры морских нефтегазовых сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, rincom1T@yandex.ru

V. A. Lugovaya, V. V. Yaroshik

PECULIARITIES OF FACING OF COMPOSITE ALLOYS AT HARDENING OF WORKING SURFACE OF SOLID OF ROTATION

The authors develop the method of hardening of working surfaces of solid of rotation by electroslag facing of composite materials by non-consumable electrode with supply of powdery alloy components in weld pool. The physical and mechanical properties of tested materials are studied, the efficiency of their use is proved.

Key words: composite materials, composition, electroslag facing, structure, wearability.

REFERENCES

1. Bystrov V. A., Bystrov A. V. [Study of properties of composite alloys built-up by electroslag facing]. *Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy naplavki. Naplavochnye materialy* [Theoretical and technological principals of facing. Alloying materials]. Kiev, IES named after E. O. Paton Publ., 1978. Pp. 98—102.

2. Ksendzyk G. V., Frumin I. I., Kuskov Yu. M. [Electroslag facing with granular additives]. *Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy naplavki. Novye protsessy mekhanizirovannoi naplavki* [Theoretical and technological principals of facing. New processes of mechanized facing]. Kiev, IES named after E. O. Paton Publ., 1987. Pp. 89—95.

3. Dudko D. A., Zelenin V. I., Netesa I. V. *Novye iznosostoikie kompozitsionnye splavy. Iznosostoikie naplavochnye materialy na osnove tugoplavkikh soedinenii* [New wearproof composite

alloys. Wearproof alloying materials based on high-melting compounds]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1977. 187 p.

4. Howard A. Ferguson. Heat Treating of Powder Metallurgy Steels. *ASM Handbook. Vol. 4: Heat treating*, 2002, pp. 229—237.

5. Shekhter S. Ya., P'yankov V. V., Lazarenko Yu. N., Kakoshnikova B. E. [Experience of application of facing in iron and steel industry in Ukraine]. *Naplavka. Opyt i effektivnost' primeneniya* [Facing. Experience and efficiency of application]. Kiev, IES named after E. O. Paton Publ., 1995. Pp. 9—13.

6. Ole A. Sandven. Laser Surface Hardening. *ASM Handbook. Vol. 4: Heat treating*, 2002, pp. 286—297.

7. Hitesh Vasudev. Hardfaced layer on mild steel made by paste technique with smaw electrode to improve surface properties. *International Journal of Advance research, Ideas and Innovations in technology*, 2014, 1(1), Oct. URL: <http://www.ijariit.com/manuscripts/m1p1/MIP1-1136.pdf>

8. Sinha P. K. *Composite materials and structures*. Published by Composite Centre of Excellence, AR & DB. Department of Aerospace Engineering I.I.T. Kharagpur. URL: http://www.ae.iitkgp.ernet.in/courses/AE40006%20-%20COMPOSITE%20STRUCTURES/PKS_COMPOSITE_part1.pdf

9. Sterenbogen Yu. A., Kulik V. M., Moiseev A. V. [Some technological features of electros slag facing by liquid granular additives]. *Novye protsessy naplavki, svoystva naplavlennogo metalla i perekhodnoi zony* [New facing processes, properties of alloying metal and a transitional zone]. Kiev, IES named after E. O. Paton Publ., 1984. Pp. 34—39.

10. Oreshkin V. D., Lugovaya V. A. [Wearproof composite karboborid coverings]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Technical science], 2001, iss. 1(4), pp. 119—122.

11. Oreshkin V. D., Lugovaya V. A., Lobanova E. T., Lukina I. G. [Wear-resistant coating based on titanium karboborid working bodies cast parts]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2011, iss. 21(40), pp. 110—114.

12. Spiridonova I. M., Sukhovaya E. V., Butenko B. F., Novodran A. N. [Borated composite materials for facing of valves of blast furnaces]. *Naplavka pri izgotovlenii detalei mashin i oborudovaniya* [Facing at production of parts of machines and equipment]. Kiev, IES named after E. O. Paton Publ., 1986. Pp. 34—40.

13. Pashchenko M. A., Frumin E. I. [Facing of rock cutting tools]. *Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy naplavki. Naplavka v mashinostroenii i remonte* [Theoretical and technological principals of facing. Facing in mechanical engineering and repair]. Kiev, IES named after E. O. Paton Publ., 1981. Pp. 65—75.

14. Lugovaya V. A., Lobanova E. T., Lukina I. G. [High durable covers based on nitride and karboborid of refractory metals]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2012, iss. 27(46), pp. 9—15.

15. Arisova V. N., Oreshkin V. D., Lugovaya V. A. [Structure of covering on iron-carbon alloys for the improvement of technology of electros slag facing]. *Mezhvuzovskii sbornik trudov VGTU* [Interuniversity collection of works of VSTU]. Volgograd, 2005. Pp. 30—34.

For citation:

Lugovaya V. A., Yaroshik V. V. [Peculiarities of facing of composite alloys at hardening of working surface of solid of rotation]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 40(59), pp. 166—173.

About authors:

Lugovaya Valentina Alekseevna — Candidate of Engineering Science, Docent, Professor of Sea Oil and Gas Constructions Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, rincom1T@yandex.ru

Yaroshik Vladimir Viktorovich — Docent of Sea Oil and Gas Constructions Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, rincom1T@yandex.ru

УДК 691.115

Д. В. Орешкин^а, Е. Ю. Горностаева^б, П. В. Капцов^а, Т. Э. Хаев^а

^а *Московский государственный строительный университет*

^б *ООО МИП «Нанокompозит-БГИТА»*

ДРЕВЕСНО-ЦЕМЕНТНЫЕ КОМПОЗИЦИИ С УЛУЧШЕННЫМИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ

Рассмотрены вопросы получения древесно-цементных композиций с улучшенными физико-техническими показателями при введении в состав композиции микро- и нанодисперсных добавок.

Ключевые слова: древесно-цементные композиции, микрокремнезем, добавка с наноразмерными частицами кремнезема, добавка с наноразмерными частицами шунгита.

В настоящее время одним из основных направлений развития производства строительных материалов и изделий является использование техногенного сырья, в том числе и древесных отходов [1—5]. Это связано с ограниченностью сырья, экологическими проблемами, транспортными затратами на перевозку, высокой энергоемкостью технологических процессов добычи и переработки сырья [6, 7]. Указанные причины сдерживают развитие промышленности строительных материалов на основе природных ресурсов [8].

Ежегодно в нашей стране в отходы уходит более 100 млн м³ древесины в лесозаготовительной и деревообрабатывающей промышленности в виде сучьев, вершин, ветвей, горбылей, реек, опилок и стружек [1, 2, 6, 7]. Все эти отходы древесины необходимо утилизировать, расходуя дополнительные средства. В Европе используют фибру [8, 9]. Только на территории Брянской области за последнее время скопилось около 20 тыс. т древесных отходов [6, 7].

Актуальным является получение древесно-цементных композиций (ДЦК) на основе отходов деревообрабатывающей и деревоперерабатывающей промышленности [10—15].

Получение экологичных древесно-цементных изделий на основе указанных отходов позволит сохранить земельные площади, отводимые под отвалы [16—19]. Это позволит улучшить экологическую обстановку в Брянской области [1, 2, 5—7].

Для производства древесно-цементных композиций в настоящее время применяются различные целлюлозосодержащие наполнители растительного происхождения (низкосортная и некондиционная древесина, дровяное долготье, неделовой горбыль, срезки, торцы, станочная стружка, щепы, пиломатериалы, опилки, одубина и т. п.) [9—19].

Одной из основных особенностей целлюлозосодержащих наполнителей является наличие сахаров и других водорастворимых веществ, негативно влияющих на процессы структурообразования и прочность цементных материалов. Также к отрицательным факторам можно отнести их повышенную химическую активность и склонность к загниванию [19—24].

Проведенные ранее исследования [1, 2] показали, что прочность древесно-цементных композиций удастся увеличить лишь на 10...15 % почти при полном удалении легкогидролизуемых веществ из древесного заполнителя. Следовательно, наличие таких веществ в заполнителе можно рассматривать лишь как один из его недостатков. Это означает, что, кроме химической агрессивности (содержание экстрактивных и легкогидролизуемых веществ), древесный заполнитель обладает и другими специфическими свойствами, которые отрицательно воздействуют на структурную прочность ДЦК и поэтому должны учитываться в технологии их производства.

Одним из направлений получения древесно-цементных композиций с высокими физико-техническими характеристиками является использование нового вида добавок — модификаторов структуры и свойств бетонов — нанодисперсных добавок [23—25].

Наиболее простым и эффективным способом решения этой задачи является модифицирование структуры на микро- и наноуровне за счет использования различного рода добавок [23, 26—32].

Целью работы являлось исследование влияния микро- и нанодисперсных добавок на физико-технические свойства древесно-цементных композиций.

В качестве микрозаполнителя использовался микрокремнезем, а в качестве нанодисперсных добавок — добавки с наноразмерными частицами шунгита и кремнезема, в качестве органического заполнителя — отходы лесозаготовительной и деревообрабатывающей промышленности, представляющие собой опилки как хвойных, так и лиственных пород деревьев. Фракционный состав древесных отходов соответствовал требованиям ГОСТ 19222. Влажность при высушивании древесных отходов в сушильном шкафу при температуре 35 °С составила 9,89 %, насыпная плотность — 95 кг/м³.

В качестве вяжущего использовался портландцемент марки ЦЕМ I 42,5 Н, соответствующий требованиям ГОСТ 10178 и ГОСТ 22266, предъявляемым к вяжущим материалам для производства арболита.

Микрокремнезем вводился в смесь вместе с цементом в количестве от 3 до 100 % от массы цемента. Добавки с наноразмерными частицами кремнезема и шунгита вводили в смесь вместе с водой затворения в количестве (в пересчете на сухое вещество) от 1,43 до 9,61 % и от 0,14 до 0,96 % соответственно. Были определены такие физико-технические показатели, как средняя плотность, коэффициент теплопроводности, предел прочности при сжатии и водопоглощение.

Кроме этого исследовалось влияние комплексного применения микрокремнезема и добавок с нанодисперсными частицами:

древесно-цементные композиции с содержанием 50 % микрокремнезема и от 0,14 до 0,96 % добавки с наноразмерными частицами шунгита;

древесно-цементные композиции с содержанием 10 % микрокремнезема и от 1,43 до 9,61 % добавки с наноразмерными частицами кремнезема;

древесно-цементные композиции с содержанием 2,87 % добавки с наноразмерными частицами кремнезема и от 5 до 30 % микрокремнезема.

Микроструктурные исследования образцов проводили с помощью программно-аппаратного комплекса, включающего высокоразрешающий растровый электронный микроскоп Quanta 200 3D, совмещенный с персональным компьютером.

На основании полученных данных влияния содержания микрокремнезема на физико-технические свойства древесно-цементных композиций были построены графики, представленные на рис. 1—4.

Установлено, что введение микрокремнезема в количестве 3 % (от массы цемента) позволяет повысить предел прочности при сжатии в 4,5 раза по сравнению с контрольной ДЦК, средняя плотность при этом снижается в 1,3 раза. Увеличение содержания микродисперсной добавки до 20 % приводит к увеличению прочности в 31,3 раза, а средняя плотность при этом соответствует плотности древесно-цементной композиции без микрокремнезема и составляет $744,2 \text{ кг/м}^3$. Дальнейшее увеличение содержания добавки приводит к снижению предела прочности при сжатии от 7,42 до 1,02 МПа.

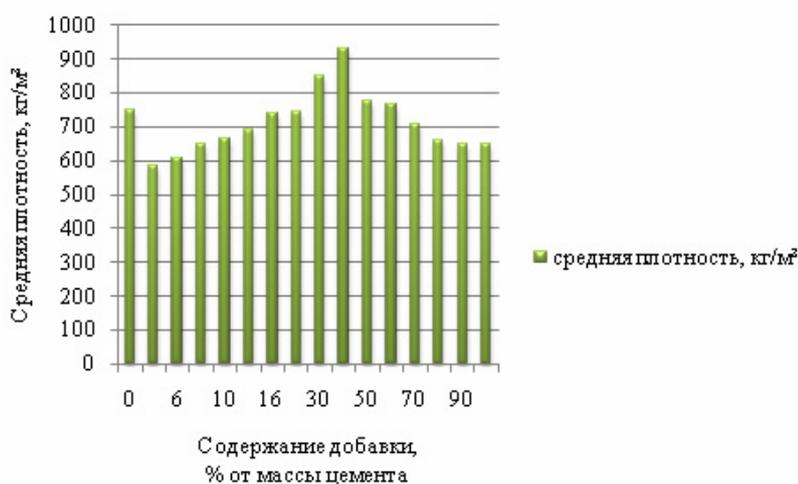


Рис. 1. График зависимости средней плотности от количества микрокремнезема



Рис. 2. График зависимости предела прочности при сжатии от количества микрокремнезема



Рис. 3. График зависимости коэффициента теплопроводности от количества микрокремнезема



Рис. 4. График зависимости водопоглощения от количества микрокремнезема

При содержании микрокремнезема в количестве 30 и 40 % средняя плотность составляет 848,9 и 931 кг/м³, при дальнейшем увеличении содержания добавки наблюдается снижение средней плотности до 650,8 кг/м³.

Водопоглощение древесно-цементной композиции при введении в ее состав добавки (в количестве 3 %) повышается по сравнению с контрольным составом. При увеличении содержания микрокремнезема от 6 до 40 % наблюдается снижение водопоглощения с 93 до 20,1 %.

При введении в состав древесно-цементной композиции микрокремнезема коэффициент теплопроводности образцов изменяется в зависимости от средней плотности. Подобное действие микрокремнезема оказывает влияние на свойства древесно-цементной композиции в связи с тем, что его высокая

активность определена наличием диоксида кремния аморфной модификации и наличием ультрадисперсных частиц сферической формы.

Использование добавок с наноразмерными частицами кремнезема обусловлено их способностью взаимодействовать с гидросиликатом кальция, образуя труднорастворимые смешанные соли, которые кальматируют поры.

Результаты испытаний ДЦК с применением добавок с наноразмерными частицами приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний древесно-цементных композиций с применением добавок с наноразмерными частицами

Номер состава	Расход добавки, % (в пересчете на сухое вещество)	ρ_0 , кг/м ³	λ , Вт/(м·°С)	$R_{сж}$, МПа	B_m , %
1	2	3	4	5	6
1	0	747	0,322	0,24	86,5
Добавка с наноразмерными частицами шунгита					
2	0,14	665	0,274	0,31	83,0
3	0,29	662	0,273	0,36	82,5
4	0,43	651	0,266	0,36	81,3
5	0,62	651	0,266	0,31	84,8
6	0,77	637	0,258	0,25	93,3
7	0,96	580	0,226	0,20	117,1
Добавка с наноразмерными частицами кремнезема					
8	1,43	712	0,302	1,86	49,2
9	2,87	715	0,303	2,10	47,4
10	4,30	734	0,314	2,49	46,9
11	6,22	745	0,321	2,70	45,9
12	7,70	757	0,328	2,76	44,1
13	9,61	759	0,329	3,15	43,5

Использование добавки с наноразмерными частицами шунгита в количестве 0,14 % (в пересчете на сухое вещество) приводит к снижению средней плотности на 11 %, коэффициента теплопроводности на 15 %, при этом предел прочности при сжатии увеличивается на 22,5 %. При дальнейшем увеличении содержания добавки наблюдается снижение средней плотности и, соответственно, коэффициента теплопроводности. Так, при введении 0,96 % добавки в состав ДЦК средняя плотность снижается на 22 %, а коэффициент теплопроводности на 30 %. При использовании добавки в количестве 0,43 % предел прочности при сжатии ДЦК увеличивается на 33,6 %, при дальнейшем увеличении добавки от 0,62 до 0,96 % наблюдается снижение прочности.

Водопоглощение древесно-цементных композиций при введении добавки с наноразмерными частицами шунгита в количестве от 0,14 до 0,43 % приводит к снижению водопоглощения на 4...6 %. При дальнейшем увеличении содержания добавки наблюдается возрастание водопоглощения. При использовании последней в количестве 0,96 % значение водопоглощения модифицированной ДЦК превысило значение водопоглощения контрольных образцов на 26 %.

Введение в состав композиции добавки с наноразмерными частицами кремнезема в количестве 1,43 % приводит к увеличению предела прочности при сжатии (по сравнению с контрольным составом) на 87 %. При этом наблюдается снижение средней плотности, коэффициента теплопроводности и водопоглощения на 5, 6 и 43 % соответственно. При увеличении содержания добавки до 9,61 % происходит незначительный рост средней плотности (1,6 %), а значит, и коэффициента теплопроводности (2,1 %).

Предел прочности при сжатии при введении в состав ДЦК до 9,61 % добавки приводит к увеличению предела прочности при сжатии на 92,5 % по сравнению с контрольным составом и на 41 % по сравнению с древесно-цементной композицией, в состав которой вводили 1,43 % добавки с наноразмерными частицами кремнезема.

При увеличении содержания добавки с наноразмерными частицами кремнезема до 9,61 % водопоглощение снижается на 49,7 % по сравнению с контрольным составом и на 12 % по сравнению с древесно-цементной композицией, в состав которой вводили только 1,43 % добавки.

Результаты исследования влияния комплексного применения микрокремнезема и добавок с нанодисперсными частицами представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

*Результаты испытаний древесно-цементных композиций
с применением микронаполнителей и нанодобавок*

Номер состава	Расход добавки, % (в пересчете на сухое вещество)	ρ_0 , кг/м ³	λ , Вт/(м·°С)	$R_{сж}$, МПа	V_m , %
1	0	747	0,322	2,37	86,5
Микрокремнезем (50 % — 240 кг) и добавка с наноразмерными частицами шунгита					
2	0,14	877,2	0,399	7,86	26,1
3	0,29	905,5	0,416	8,67	16,7
4	0,43	962,1	0,450	11,01	14,6
5	0,62	707,4	0,299	2,703	27,0
6	0,77	792,3	0,349	3,774	27,8
7	0,96	735,7	0,315	3,825	33,7
Микрокремнезем (10 % — 48 г) и добавка с наноразмерными частицами кремнезема					
8	1,43	670,6	0,278	3,52	65,3
9	2,87	702,6	0,296	5,30	66,4
10	4,30	712,2	0,302	4,12	67,9
11	6,22	711,6	0,301	3,67	66,6
12	7,70	699,8	0,295	2,05	63,5
13	9,61	688,4	0,288	1,38	60,8
Добавка с наноразмерными частицами кремнезема (2,87 %) и микрокремнеземом					
14	5	690,4	0,249	2,99	70
15	10	610,4	0,243	5,71	65,5
16	15	610,4	0,243	6,24	62,6
17	20	756,4	0,328	10,35	62,2
18	25	764,0	0,332	10,68	58,6
19	30	825,4	0,368	14,7	49,1

Исследования показали, что при совместном использовании микрокремнезема в количестве 50 % и добавки с наноразмерными частицами шунгита в количестве 0,14 % (в пересчете на сухое вещество) предел прочности при сжатии увеличивается на 97 % по сравнению с контрольными образцами. При этом средняя плотность и коэффициент теплопроводности увеличиваются на 15 и 19 % соответственно, а водопоглощение снижается на 70 %.

Наибольшее влияние на свойства древесно-цементной композиции оказало использование наряду с микрокремнеземом (50 %) добавки с наноразмерными частицами шунгита в количестве 0,43 %. Водопоглощение снизилось на 83 % по сравнению с контрольными образцами, предел прочности при сжатии увеличился на 98 %, а средняя плотность и коэффициент теплопроводности — на 22 и 28 % соответственно.

При введении в состав древесно-цементной композиции 10 % микрокремнезема и добавки с наноразмерными частицами кремнезема в количестве 2,78 % от массы цемента происходит рост прочности при сжатии с 3,52 до 5,30 МПа. При дальнейшем увеличении содержания добавки с наноразмерными частицами кремнезема до 9,61 % прочность снижается до 1,38 МПа.

Средняя плотность и коэффициент теплопроводности при этом изменяются следующим образом.

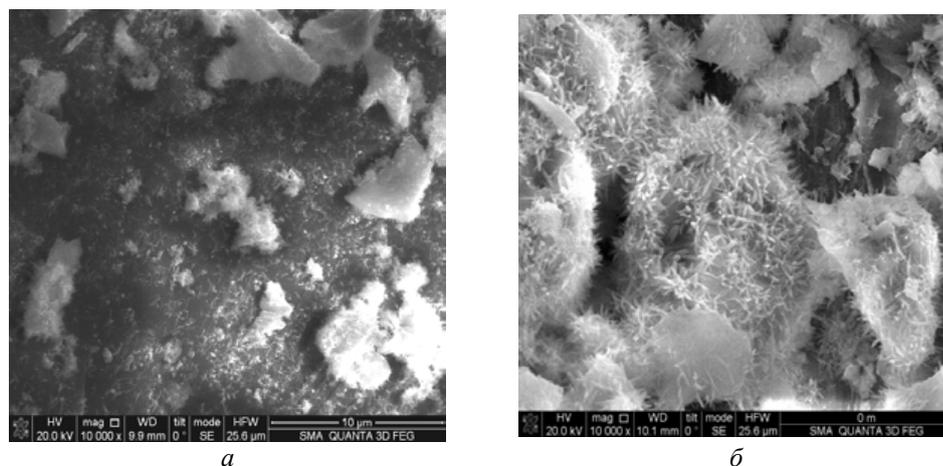
При содержании добавки с наноразмерными частицами кремнезема от 1,43 до 4,30 % наблюдается увеличение средней плотности на 6 % по сравнению с образцами, в состав которых вводили 1,43 % добавки с наноразмерными частицами кремнезема, коэффициента теплопроводности — на 8 %, водопоглощение при этом увеличилось на 4 %.

При увеличении содержания добавки с наноразмерными частицами кремнезема с 6,22 до 9,61 % наблюдается снижение средней плотности на 4 % по сравнению с образцами, в состав которых вводили 6,22 % добавки с наноразмерными частицами кремнезема, коэффициента теплопроводности — на 5 %, водопоглощение при этом снизилось на 11 %.

При комплексном использовании микрокремнезема, в количестве 10 % от массы цемента, и добавки с нанодисперсными частицами кремнезема, оптимальное содержание последней составило 2,87 %.

Введение в состав древесно-цементной композиции добавки с наноразмерными частицами кремнезема в количестве 2,87 % и микрокремнезема в количестве от 5 до 30 % привело к увеличению предела прочности при сжатии на 98 %. При этом наблюдается снижение водопоглощения от 70 до 49,1 %. Средняя плотность и коэффициент теплопроводности увеличиваются при повышении содержания микрокремнезема. Так, средняя плотность увеличивается от 690 до 825 кг/м³, а коэффициент теплопроводности — от 0,243 до 0,368 Вт/(м·°С).

На рис. 5 представлена микроструктура контрольного образца и образца с микронаполнителем и добавкой с наноразмерными частицами кремнезема. На снимке четко видно, что при комплексном использовании микронаполнителя и добавки с наноразмерными частицами гидросиликаты кальция образуются на поверхности органического заполнителя в виде игольчатых новообразований.



а

б

Рис. 5. Микроструктура ДЦК: а — контрольный образец, б — образец с микронаполнителем и добавкой с наноразмерными частицами кремнезема

Таким образом, комплексное использование добавок с наноразмерными частицами микрокремнезема в качестве микронаполнителя позволяет регулировать структуру материала на микро- и наноуровне за счет образования труднорастворимых смешанных солей, заполняющих поры древесно-цементных композиций, что подтверждается рентгенофазовым анализом, обеспечивая, таким образом, получение древесно-цементных композиций с улучшенными физико-техническими характеристиками.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горностаева Е. Ю., Лукутцова Н. П. Получение древесно-цементных композиций с улучшенными физико-техническими показателями // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2010. № 4. С. 44—46.
2. Лукутцова Н. П., Горностаева Е. Ю., Картиков Е. Г. Древесно-цементные композиции с минеральными микронаполнителями // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2011. № 3. С. 21—23.
3. Минас А. И., Наназашвили И. Х. Специфические свойства арболита // Бетон и железобетон. 1978. № 6. С. 19—20.
4. Наназашвили И. Х., Минас А. И. Пути повышения структурной прочности и стойкости арболита в условиях попеременного увлажнения и высыхания // Труды ЦНИИЭПсельстроя. 1976. № 15. С. 112—118.
5. Орешкин Д. В., Лукутцова Н. П., Горностаева Е. Ю. Повышение качества древесно-цементных композиций добавками // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре: материалы 67-й Всероссийской науч.-технич. конф. по итогам НИР 2009 года: сб. науч. тр. Самара. 2010. С. 276—278.
6. Лукаш А. А., Плотников В. В., Ботаговский М. В. Ячеистые стеновые панели из древесных материалов // Строительные материалы. 2009. № 2. С. 72—73.
7. Лукаш А. А., Лукутцова Н. П. Гофрокартонная плита — эффективный теплоизоляционный материал // Строительные материалы. 2014. № 10. С. 24—29.
8. Орешкин Д. В. Проблемы строительного материаловедения и производства строительных материалов // Строительные материалы. 2010. № 11. С. 6—8.
9. Spear M., Hill C., Tomkinson J. Natural fibre reinforced polypropylene composites: Assessing the potential of Hemp and TMP fibre // Proc. of the 6th European Panel Products Symposium, 2002. Pp. 118—129.
10. Zhou Y., Kamdem D. P. Effect of cement/wood ratio on the properties of cement-bonded particleboard using CCA-treated wood removed from service // Forest Products Journal. 2002. № 52 (2). Pp. 73—81.

11. *Simple K. E., Evans P. D.* Wood-cement composites — Suitability of Western Australian mallee eucalyptus, blue gum and melaleucas. RIRDC: Kingston, 2004. P. 64.
12. *Papadopoulos A. N., Ntalos G. A., Kakaras I.* Mechanical and physical properties of cement-bonded OSB // On line First Holz als Roh- und Werkstoff. 2006. 64 (6). Pp. 517—518.
13. Physico-mechanical properties and decay resistance of Cupressus spp. Cement-bonded particleboards / E. Y. A. Okino, M. R. Souza, M. A. E. Santana, M. V. S. Alves, M. E. Sousa, D. E. Teixeira // Cement and Concrete Composites. 2005. 27 (2). Pp. 333—338.
14. Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood / E. Y. A. Okino, M. R. Souza, M. A. E. Santana, M. V. S. Alves, M. E. Sousa, D. E. Teixeira // Cement and Concrete Composites. 2004. 26 (6). Pp. 729—734.
15. Production and properties of oriented cement-bonded boards from sugi (Cryptomeria japonica D. Don) / L. F. Ma, H. Yamauchi, O. R. Pulido, H. Sasaki, S. Kawai. // Wood-Cement Composites in Asia-Pacific Region. Edited by Canberra: ACIAR, 2002. Pp. 140—147.
16. *Bertolini M. S.* Produção e avaliação das propriedades físico-mecânicas de compósitos lignocelulósicos produzidos a partir de madeira de Pinus sp., bambu da espécie Dendrocalamus giganteus e cimento Portland. Itapeva (SP): São Paulo State Univesity “Júlio de Mesquita Filho”, 2009.
17. Mixture of three reforestation species on the cement-wood panels production / V. A. Sá, L. Bufalino, V. C. S. Albino, A. A. Corrêa, L. M. Mendes, N. A. Almeida // Revista Árvore. Vol. 36. 2012. № 3. Pp. 549—557.
18. *Lima A. J. M., Iwakiri S., Lomeli-Ramirez M. G.* Use the residue of Pinus spp. high reactivity metakaolin and residue of ceramic calcined in wood-cement composites // Madera Y Bosques. Vol. 17. № 2 (2011). Pp. 47—65.
19. *Iwakiri S.* Painéis de Madeira Reconstituída. FUPEF, Curitiba, 2005.
20. *Matoski A.* Utilização de pó de madeira com granulometria controlada na produção de painéis de cimento-madeira : PhD thesis. Curitiba (PR): Federal University of Paraná, 2005.
21. *Karade S. R.* Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes // Construction and Building Materials. 2010. Vol. 24. № 8. Pp. 1323—1330.
22. Physical and Mechanical Properties of Wood-Cement Composite with Lignocellulosic Grading Waste Variation / R. M. Ronquim, F. S. Ferro, F. H. Icimoto, C. I. Campos, M. S. Bertolini, A. L. Christoforo, F. A. Rocco Lahr // International Journal of Composite Materials. 2014. Vol. 4. № 2. Pp. 69—72.
23. *Ashoria A., Tabarsab T., Amosib F.* Evaluation of using waste timber railway sleepers in wood-cement composite materials // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 27. № 1. Pp. 126—129.
24. Cement-bonded composites made from tropical woods: Compatibility of wood and cement M. Fan, M. K. Ndikontar, X. Zhou, J. N. Ngamveng // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 36. Pp. 135—140.
25. *Tittlein P., Cloutier A., Bissonnette B.* Design of a low-density wood-cement particleboard for interior wall finish // Cement & Concrete Composites, 2012, 34, pp. 218—222.
26. *Beraldo A. L., Carvalho J. V.* Portland cement — Eucalyptus grandis composite // Scientia Forestalis. 2004. № 65. Pp. 150—161.
27. Vegetable waste Portland cement composite / A. L. Beraldo, A. C. Arruda, A. C. Stancato, C. A. P. Sampaio, O. P. Fernandes Filho, V. M. Leonel // Brazilian Meeting on Timber and Timber Structures — EBRAMEM, 8, MG (2002), CD-ROOM.
28. ABNT. Brazilian Technical Standards Association. NBR 7215: Portland cement — Determination of compressive strength. Rio de Janeiro, 1996.
29. ABNT. Brazilian Technical Standards Association. NBR 8522: Concrete — Determination of the elasticity modulus by compression. Rio de Janeiro, 1984.
30. *Torkaman J., Ashori A., Momtazi A. S.* Using wood fiber waste, rice husk ash, and limestone powder waste as cement replacement materials for lightweight concrete blocks // Construction and Building Materials. 2014. № 50. Pp. 432—436.
31. Assessment of the effects of rice husk ash particle size on strength, water permeability and workability of binary blended concrete / A. N. Givi, S. A. Rashid, F. N. A. Aziz, M. A. M. Salleh // Construction and Building Materials. 2010. № 24. Pp. 2145—2150.
32. *Lima A. M.* Influência de três tipos de tratamentos físicos na resistência à compressão de compósitos cimento-madeira à base de resíduos de serraria [dissertation]. Belém (PA): Federal University of Pará, 2005.

© Орешкин Д. В., Горностаева Е. Ю., Капцов П. В., Хаев Т. Э., 2015

Поступила в редакцию
в марте 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Древесно-цементные композиции с улучшенными физико-техническими показателями / Д. В. Орешкин, Е. Ю. Горностаева, П. В. Капцов, Т. Э. Хаев // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 40(59). С. 174—185.

Об авторах:

Орешкин Дмитрий Владимирович — профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой строительных материалов, Московский государственный строительный университет (МГСУ). Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, dmitrii_oreshkin@mail.ru

Горностаева Елена Юрьевна — канд. техн. наук, зав. лабораторией ООО МИП «Нанокompозит-БГИТА». Российская Федерация, 241037, г. Брянск, пр. Станке Димитрова, 3, egornostay@mail.ru

Капцов Петр Владимирович — канд. техн. наук, зав. лабораторией кафедры строительных материалов, Московский государственный строительный университет (МГСУ). Российская Федерация, 129337, г. Москва, 26, Ярославское шоссе, pit-ka@mail.ru

Хаев Тотраз Эдуардович — аспирант кафедры строительных материалов, Московский государственный строительный университет (МГСУ). Российская Федерация, 129337, г. Москва, 26, Ярославское шоссе, haevt@mail.ru

D. V. Oreshkin, E. Yu. Gornostaeva, P. V. Kaptsov, T. E. Khaev

**WOOD-CEMENT COMPOSITIONS
WITH IMPROVED PHYSICAL AND TECHNICAL PROPERTIES**

The article discusses the preparation of wood-cement compositions with improved physical and technical characteristics when incorporated into the composition of micro- and nano-dispersed additives.

Key words: wood-cement compositions, microsilica, additive with nano-sized silica particles, additive with nano-sized shungite particles.

REFERENCES

1. Gornostaeva E. Yu., Lukutsova N. P. [Preparation of wood and cement compositions with improved physical and technical characteristics]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova* [Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov], 2010, no. 4, pp. 44—46.
2. Lukutsova N. P., Gornostaeva E. Yu., Karpikov E. G. [Wood and cement compositions with mineral microfillers]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova* [Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov], 2011, no. 3, pp. 21—23.
3. Minas A. I., Nanazashvili I. Kh. [Specific characteristics of wood concrete]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete], 1978, no. 6, pp. 19—20.
4. Nanazashvili I. Kh., Minas A. I. [Ways of improvement of structural strength and rigidity of wood concrete under the conditions of alternate moisture and drying out]. *Trudy TsNIEPsel'stroya* [Works of CRDIAEPsel'stroya], 1976, no. 15, pp. 112—118.
5. Oreshkin D. V., Lukutsova N. P., Gornostaeva E. Yu. [Improvement of quality of wood and cement compositions by additives]. *Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture: materialy 67-i Vserossiiskoi nauch.-tekhnich. konf. po itogam NIR 2009 goda: sb. nauch. tr.* [Traditions and innovations in construction and architecture. Proc.]. Samara, 2010, pp. 276—278.
6. Lukash A. A., Plotnikov V. V., Botagovskii M. V. [Cellular Wall Panels Made of Timber Materials]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2009, no. 2, pp. 72—73.
7. Lukash A. A., Lukutsova N. P. [Corrugated Cardboard Plate — Efficient Heat Insulating Material]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2014, no. 10, pp. 24—29.
8. Oreshkin D. V. [Problems of Building Materialogy and Production of Building Materials]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2010, no. 11, pp. 6—8.
9. Spear M., Hill C., Tomkinson J. Natural fibre reinforced polypropylene composites: Assessing the potential of Hemp and TMP fibre. *Proc. of the 6th European Panel Products Symposium*, 2002, pp. 118—129.

10. Zhou Y., Kamdem D. P. Effect of cement/wood ratio on the properties of cement-bonded particleboard using CCA-treated wood removed from service. *Forest Products Journal*, 2002, 52 (2), pp. 73—81.
11. Semple K. E., Evans P. D. *Wood-cement composites — Suitability of Western Australian mallee eucalyptus, blue gum and melaleucas*. RIRDC, Kingston. 2004. P. 64.
12. Papadopoulos A. N., Ntalos G. A., Kakaras I. Mechanical and physical properties of cement-bonded OSB. *On line First Holz als Roh- und Werkstoff*, 2006, 64 (6), pp. 517—518.
13. Okino E. Y. A., Souza M. R., Santana M. A. E., Alves M. V. S., Sousa M. E., Teixeira D. E. Physico-mechanical properties and decay resistance of Cupressus spp. Cement-bonded particleboards. *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27 (2), pp. 333—338.
14. Okino E. Y. A., Souza M. R., Santana M. A. E., Alves M. V. S., Sousa M. E., Teixeira D. E. Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood. *Cement and Concrete Composites*, 2004, 26 (6), pp. 729—734.
15. Ma L. F., Yamauchi H., Pulido O. R., Sasaki H., Kawai S. Production and properties of oriented cement-bonded boards from sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don). *Wood-Cement Composites in Asia-Pacific Region*. Edited by Canberra. ACIAR, 2002, pp. 140—147.
16. Bertolini M. S. *Produção e avaliação das propriedades físico-mecânicas de compósitos lignocelulósicos produzidos a partir de madeira de Pinus sp., bambu da espécie Dendrocalamus giganteus e cimento Portland*. Itapeva (SP), São Paulo State Univesity “Júlio de Mesquita Filho”, 2009.
17. Sá V. A., Bufalino L., Albino V. C. S., Corrêa A. A., Mendes L. M., Almeida N. A. Mixture of three reforestation species on the cement-wood panels production. *Revista Árvore*, 2012, 36(3), pp. 549—557.
18. Lima A. J. M., Iwakiri S., Lomelí-Ramirez M. G. Use the residue of Pinus spp. high reactivity metakaolin and residue of ceramic calcined in wood-cement composites. *Madera Y Bosques*, 2011, 17(2), pp. 47—65.
19. Iwakiri S. *Painéis de Madeira Reconstituída*. FUPEF, Curitiba, 2005.
20. Matoski A. *Utilização de pó de madeira com granulometria controlada na produção de painéis de cimento-madeira* [PhD thesis]. Curitiba (PR), Federal University of Paraná, 2005.
21. Karade S. R. Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(8), pp. 1323—1330.
22. Ronquim R. M., Ferro F. S., Icimoto F. H., Campos C. I., Bertolini M. S., Christoforo A. L., F. A. Rocco Lahr. Physical and Mechanical Properties of Wood-Cement Composite with Lignocellulosic Grading Waste Variation. *International Journal of Composite Materials*, 2014, 4(2), pp. 69—72.
23. Ashoria A., Tabarsab T., Amosib F. Evaluation of using waste timber railway sleepers in wood-cement composite materials. *Construction and Building Materials*, 2012, 27 (1), pp. 126—129.
24. Fan M., Ndikontar M. K., Zhou X., Ngamveng J. N. Cement-bonded composites made from tropical woods: Compatibility of wood and cement. *Construction and Building Materials*, 2012, 36, pp. 135—140.
25. Tittlein P., Cloutier A., Bissonnette B. Design of a low-density wood-cement particleboard for interior wall finish. *Cement & Concrete Composites*, 2012, 34, pp. 218—222.
26. Beraldo A. L., Carvalho J. V. Portland cement — Eucalyptus grandis composite. *Scientia Forestalis*, 2004, no. 65, pp. 150—161.
27. Beraldo A. L., Arruda A. C., Stancato A. C., Sampaio C. A. P., Fernandes Filho O. P., Leonel V. M. Vegetable waste Portland cement composite. *Brazilian Meeting on Timber and Timber Structures — EBRAMEM*, 8, MG (2002), CD-ROOM.
28. ABNT. *Brazilian Technical Standards Association. NBR 7215: Portland cement — Determination of compressive strength*. Rio de Janeiro, 1996.
29. ABNT. *Brazilian Technical Standards Association. NBR 8522: Concrete — Determination of the elasticity modulus by compression*. Rio de Janeiro, 1984.
30. Torkaman J., Ashori A., Momtazi A. S. Using wood fiber waste, rice husk ash, and limestone powder waste as cement replacement materials for lightweight concrete blocks. *Construction and Building Materials*, 2014, 50, pp. 432—436.
31. Givi A. N., Rashid S. A., Aziz F. N. A., Salleh M. A. M. Assessment of the effects of rice husk ash particle size on strength, water permeability and workability of binary blended concrete. *Construction and Building Materials*, 2010, 24, pp. 2145—2150.
32. Lima A. M. *Influência de três tipos de tratamentos físicos na resistência à compressão de compósitos cimento-madeira à base de resíduos de serraria* [dissertation]. Belém (PA), Federal University of Pará, 2005.

For citation:

Oreshkin D. V., Gornostaeva E. Yu., Kaptsov P. V., Khaev T. E. [Wood-cement compositions with improved physical and technical properties]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 40(59), pp. 174—185.

About authors:

Oreshkin Dmitrii Vladimirovich — Professor, Doctor of Engineering Science, Head of Construction Materials Department, Moscow State University of Civil Engineering (MSUCE), 26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, dmitrii_oreshkin@mail.ru

Gornostaeva Elena Yur'evna — Candidate of Engineering Science, Head of Laboratory of the LLC MIP "Nanocomposite-BGITA". 3, Prospect Stanke Dimitrov, Bryansk, 241037, Russian Federation, eegornostay@mail.ru

Kaptsov Petr Vladimirovich — Candidate of Engineering Science, Head of the Laboratory Department of Construction Materials, Moscow State University of Civil Engineering (MSUCE). 26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, pit-ka@mail.ru

Khaev Totraz Eduardovich — Postgraduate student of Construction Materials, Moscow State University of Civil Engineering (MSUCE). 26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, haevt@mail.ru

УДК 624. 075+539.431.1

Г. И. Беликов, Е. И. Журбина, С. В. Алексигов

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

УСТОЙЧИВОСТЬ ТОНКИХ УПРУГИХ ПОДКРЕПЛЕННЫХ ПЛАСТИНОК В МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Рассмотрена задача устойчивости тонкой упругой подкрепленной пластинки на основе континуальной расчетной схемы. Приведен подробный вывод основного линейаризованного уравнения теории устойчивости прямоугольной пластинки. Рассмотрен аналитический метод решения основного уравнения устойчивости при сжатии пластинки по граням распределенной нагрузкой постоянной интенсивности. Предложены решения рационализации пластинки с точки зрения расхода материала.

Ключевые слова: устойчивость, подкрепленная пластинка, континуальная расчетная схема, рационализация топологии пластинки.

Подкрепленные пластинки являются элементами современных конструкций, применяемых в мостостроении, строительстве, авиастроении и судостроении. Увеличением несущей способности пластин при их работе на изгиб и устойчивость является подкрепление их упругими ребрами.

Все исследования в области теории сетчатых и подкрепленных пластинок и оболочек ведутся по дискретным [1—8] и континуальным расчетным схемам [9—14]. Исследования, относящиеся к каждому из двух направлений, успешно дополняют друг друга. Граница применимости каждого из этих двух направлений до сих пор не определена. Исследование построено на моделировании подкрепленных пластинок как конструктивно анизотропных пластинок на базе континуальной расчетной модели [9, 10]. Область применимости такой расчетной модели достаточно широка. Точность решения задач зависит от густоты сетки (ребер) и характера внешних воздействий. При достаточно густой сетке подкрепления континуальная модель более эффективна.

В качестве объекта исследования рассматривается прямоугольная пластинка, подкрепленная регулярно расположенными ребрами жесткости.

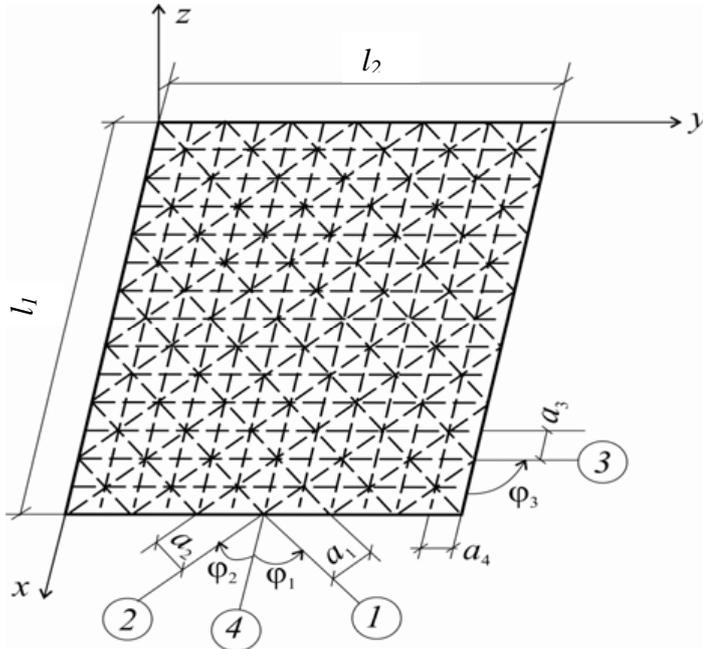
Обозначим длину пластинки l_1 и ширину l_2 . Систему ребер заменим конструктивно анизотропными слоями [9]. Для многослойной пластинки, эквивалентной рассматриваемой, считаются справедливыми гипотезы технической теории тонких упругих пластинок.

Координатные оси x, y будем располагать в срединной поверхности обшивки пластинки, которую принимаем за поверхность приведения. Координату z направим вверх, т. е. по внешней нормали. Примем, что толщина h пластины существенно меньше других размеров пластины в плоскости x, y . Пластинка подкреплена ребрами четырех семейств (рис.).

Оси ребер отстоят от срединной плоскости обшивки на расстоянии e_i в направлении, противоположном направлению оси z . Примем, что ребра первого и второго семейств одинаковы и в общем случае могут отличаться от ребер третьего и четвертого семейств. Ребра каждой группы заменим некоторым эквивалентным конструктивно анизотропным слоем, толщина которого h^* .

$$h^* = \frac{2A_1}{a_1} + \frac{A_3}{a_3} + \frac{A_4}{a_4}, \quad (1)$$

где A_i — площадь поперечного сечения ребра; a_i — расстояние между осями соседних ребер.



Пластика, подкреплённая ребрами четырёх семейств

Погонные усилия и моменты, действующие в срединной поверхности обшивки, определяются через усилия и моменты, возникающие в отдельных конструктивно анизотропных слоях, по формулам

$$N_i = \sum_{j=0}^4 N_i^{(j)}, \quad S_i = \sum_{j=0}^4 S_i^{(j)}, \quad M_i = \sum_{j=0}^4 (M_i^{(j)} + e_j N_i^{(j)}),$$

$$H_i = \sum_{j=0}^4 (H_i^{(j)} - e_j S_i^{(j)}) \quad (i=1, 2). \quad (2)$$

Здесь индекс $j=0$ относится к усилиям и моментам обшивки, $e_0 \equiv 0$.

Каждый слой, образованный ребрами жесткости, будем рассматривать как сетчатую пластинку.

Компоненты деформации срединной поверхности каждого j -го слоя могут быть определены компонентами деформации срединной поверхности обшивки по формулам

$$\varepsilon_k^{(j)} = \varepsilon_k - e_j \chi_k, \quad \omega^{(j)} = \omega - 2e_j \tau, \quad \chi_k^{(j)} = \chi_k, \quad \tau^{(j)} = \tau \quad (k=1, 2). \quad (3)$$

Таким образом, исследуемую конструкцию представим как четырехслойную: первый слой — обшивка, второй слой состоит из одинаковых ребер первого и второго семейств, третий слой состоит из ребер третьего семейства, четвертый слой — из ребер четвертого семейства.

Топология сетки подкрепления имеет следующие параметры (см. рис. 1):

$$\varphi_1 = \varphi, \varphi_2 = -\varphi_1, \varphi_3 = \pi/2, \varphi_4 = 0; a_1 = a_2 = 2a_4 \cos \varphi_1 = 2a_3 \sin \varphi_1, \quad (4)$$

где φ_i — угол между осью x и осью стержня (отсчитывается от оси x в направлении оси y).

При рассмотрении расчетной континуальной модели подкрепленной прямоугольной пластинки используются три группы уравнений.

Статические или уравнения движения и геометрические уравнения совпадают с соответствующими уравнениями теории сплошных пластинок.

Уравнения состояния (уравнения упругости) зависят от структуры сетки и ее материала и обшивки. Точность решения задач зависит от плотности сетки и характера внешних воздействий.

Статические уравнения с учетом поперечных сил и сил, действующих в срединной поверхности,

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_1}{\partial x} + \frac{\partial S_1}{\partial y} + X = 0; \quad \frac{\partial N_2}{\partial x} + \frac{\partial S_2}{\partial y} + Y = 0; \quad S_1 = S_2 = S; \\ \frac{\partial Q_1}{\partial x} + \frac{\partial Q_2}{\partial y} + Z = 0; \quad \frac{\partial H_1}{\partial x} - \frac{\partial M_2}{\partial y} - Q_2 = 0; \quad \frac{\partial H_2}{\partial y} - \frac{\partial M_1}{\partial x} - Q_1 = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Геометрические уравнения:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_2 = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \omega = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}; \\ \chi_1 = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \quad \chi_2 = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \quad \tau = -\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \end{aligned} \quad (6)$$

Третью группу уравнений упругости (состояния) получим исходя из континуальной расчетной схемы [9].

Для первого слоя (изотропная пластинка) имеем уравнения состояния:

$$\begin{aligned} N_1^{(0)} = \frac{Eh}{1-\nu^2}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2), \quad N_2^{(0)} = \frac{Eh}{1-\nu^2}(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1), \\ S_1^{(0)} = S_2^{(0)} = S^{(0)} = \frac{Eh}{2(1+\nu)}\omega, \quad M_1^{(0)} = -D(\chi_1 + \nu\chi_2), \end{aligned} \quad (7)$$

$$M_2^{(0)} = -D(\chi_2 + \nu\chi_1), \quad H_1^{(0)} = H_2^{(0)} = H^{(0)} = D(1-\nu)\tau, \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}.$$

Для расчетной модели сетчатой пластинки [9], состоящей из четырех семейств стержней (ребер), формулы погонных усилий и моментов имеют вид:

$$\begin{aligned}
 N_1 &= \sum_{i=1}^4 \frac{N_i^* \cos^2 \varphi_i}{a_i}, \quad N_2 = \sum_{i=1}^4 \frac{N_i^* \sin^2 \varphi_i}{a_i}, \quad S_1 = S_2 = S = \sum_{i=1}^4 \frac{N_i^* \sin \varphi_i \cos \varphi_i}{a_i}, \\
 M_1 &= \sum_{i=1}^4 \left(\frac{M_i^* \cos^2 \varphi_i}{a_i} + \frac{H_i^* \sin \varphi_i \cos \varphi_i}{a_i} \right), \quad Q_1 = \sum_{i=1}^4 \frac{Q_i^* \cos \varphi_i}{a_i}, \\
 M_2 &= \sum_{i=1}^4 \left(\frac{M_i^* \sin^2 \varphi_i}{a_i} - \frac{H_i^* \sin \varphi_i \cos \varphi_i}{a_i} \right), \quad Q_2 = \sum_{i=1}^4 \frac{Q_i^* \sin \varphi_i}{a_i}, \\
 H_1 &= - \sum_{i=1}^4 \left(\frac{M_i^* \sin \varphi_i \cos \varphi_i}{a_i} - \frac{H_i^* \cos^2 \varphi_i}{a_i} \right), \\
 H_2 &= - \sum_{i=1}^4 \left(\frac{M_i^* \sin \varphi_i \cos \varphi_i}{a_i} + \frac{H_i^* \sin^2 \varphi_i}{a_i} \right), \tag{8}
 \end{aligned}$$

где усилия и моменты в стержнях (ребрах) сетчатой пластинки в зависимости от компонентов деформации принимаем в виде:

$$\begin{aligned}
 N_i^* &= E_i A_i \varepsilon_i^*, \quad M_i^* = -E_i J_{1i} \chi_i^*, \quad H_i^* = -G_i J_{3i} \tau_i^*, \\
 Q_i^* &= - \left(\cos \varphi_i \frac{\partial}{\partial x} + \sin \varphi_i \frac{\partial}{\partial y} \right) M_i^*. \tag{9}
 \end{aligned}$$

Здесь A_i, J_{1i}, J_{3i} — площадь, главные центральные моменты инерции, соответствующие изгибу в нормальной срединной поверхности, и момент инерции при кручении поперечного сечения стержня (ребра); E_i, G_i — модуль продольной упругости и модуль упругости при сдвиге материала.

Компоненты деформации оси стержня i -го семейства сетчатой пластинки определяются по следующим выражениям:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_i^* &= \varepsilon_1 \cos^2 \varphi_i + \varepsilon_2 \sin^2 \varphi_i + \omega \sin \varphi_i \cos \varphi_i, \\
 \chi_i^* &= \chi_1 \cos^2 \varphi_i + \chi_2 \sin^2 \varphi_i + \tau \sin 2\varphi_i, \\
 \tau_i^* &= (\chi_2 - \chi_1) \sin \varphi_i \cos \varphi_i + \tau \cos 2\varphi_i, \tag{10}
 \end{aligned}$$

Подставляя в зависимости (8) соотношения (9), (10) с учетом (4) и компоненты деформации срединной поверхности j -го слоя, определяемые через компоненты деформации срединной обшивки по формулам (3), получим уравнения состояния для второго, третьего и четвертого конструктивно анизотропных слоев.

Далее, усилия и моменты, возникающие в отдельных слоях пластинки, приведем к погонным усилиям и моментам, действующим в срединной поверхности обшивки, по формулам (2).

Окончательные формулы для погонных усилий и моментов четырехслойной пластинки определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}
 N_1 &= c_{11}\varepsilon_1 + c_{12}\varepsilon_2 + c_{13}\chi_1 + c_{14}\chi_2, \\
 N_2 &= c_{21}\varepsilon_1 + c_{22}\varepsilon_2 + c_{23}\chi_1 + c_{24}\chi_2, \\
 M_1 &= c_{31}\varepsilon_1 + c_{32}\varepsilon_2 + c_{33}\chi_1 + c_{34}\chi_2, \\
 M_2 &= c_{41}\varepsilon_1 + c_{42}\varepsilon_2 + c_{43}\chi_1 + c_{44}\chi_2, \\
 S &= S_1 = S_2 = c_{55}\omega + c_{56}\tau, \\
 H_1 &= c_{65}\omega + c_{66}\tau, \\
 H_2 &= c_{75}\omega + c_{76}\tau,
 \end{aligned} \tag{11}$$

где

$$\begin{aligned}
 c_{11} &= D_0 + 2K_1 \cos^4 \varphi_1 + K_4, \quad c_{12} = c_{21} = D_0\nu + K_1 \frac{\sin^2 2\varphi_1}{2}, \\
 c_{13} &= -e_4 K_4 - e_1 2K_1 \cos^4 \varphi_1, \quad c_{31} = -c_{13}, \quad c_{14} = c_{23} = -e_1 \frac{K_1 \sin^2 2\varphi_1}{2}, \\
 c_{41} &= -c_{14}, \quad c_{22} = D_0 + 2K_1 \sin^4 \varphi_1 + K_3, \quad c_{32} = -c_{23}, \\
 c_{24} &= -(e_1 2K_1 \sin^4 \varphi_1 + e_3 K_3), \quad c_{42} = -c_{24}, \\
 c_{33} &= -D - 2I_1 \cos^4 \varphi_1 - \frac{C_1}{2} \sin^2 2\varphi_1 - 2e_1^2 K_1 \cos^4 \varphi_1 - I_4 - e_4^2 K_4, \\
 c_{34} &= c_{43} = -D\nu - (I_1 - C_1 + e_1^2 K_1) \frac{\sin^2 2\varphi_1}{2}, \\
 c_{44} &= -D - (2I_1 + e_1^2 K_1) \sin^4 \varphi_1 - C_1 \frac{\sin^2 2\varphi_1}{2} - I_3 + e_3^2 K_3, \\
 c_{55} &= \frac{Eh}{2(1+\nu)} + K_1 \frac{\sin^2 2\varphi_1}{2}, \quad c_{56} = c_{65} = -e_1 K_1 \sin^2 2\varphi_1, \quad c_{75} = c_{56} / 2, \\
 c_{66} &= D(1-\nu) + I_1 \sin^2 2\varphi_1 + 2C_1 \cos^2 \varphi_1 \cos 2\varphi_1 + e_1^2 K_1 \sin^2 2\varphi_1 + C_4, \\
 c_{76} &= D(1-\nu) + I_1 \sin^2 2\varphi_1 - 2C_1 \sin^2 \varphi_1 \cos 2\varphi_1 + e_1^2 K_1 \sin^2 2\varphi_1 + C_3,
 \end{aligned}$$

где $D_0 = \frac{Eh}{1-\nu^2}$, $K_1 = \frac{E_1 A_1}{a_1}$, $K_2 = K_1$, $K_3 = \frac{E_3 A_3}{a_3}$, $K_4 = \frac{E_4 A_4}{a_4}$, $I_1 = \frac{E_1 J_{11}}{a_1}$,
 $I_2 = I_1$, $I_3 = \frac{E_3 J_{13}}{a_3}$, $I_4 = \frac{E_4 J_{14}}{a_4}$, $C_1 = \frac{G_1 J_{31}}{a_1}$, $C_2 = C_1$, $C_3 = \frac{G_3 J_{33}}{a_3}$, $C_4 = \frac{G_4 J_{34}}{a_4}$.

Для расчета пластинки имеем систему уравнений (5), (6), (11) с неизвестными $u, v, w, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \omega, \chi_1, \chi_2, \tau, N_1, N_2, Q_1, Q_2, M_1, M_2, H_1, H_2$. Граничные условия могут быть выражены через усилия и моменты, перемещения или в смешанном виде.

Пусть пластинка, подкрепленная ребрами четырех семейств, находится под действием внешней нагрузки, вызывающей в ее плоскости лишь усилия, лежащие в плоскости приведения (обшивка).

Будем использовать статический метод в определении критической силы путем нахождения собственных чисел дифференциального уравнения устойчивости.

Если начальное напряженное состояние расчетной модели подкрепленной пластинки до потери устойчивости полагать безмоментным, то внешняя фиктивная поперечная нагрузка Z , входящая в уравнение (5), может быть выражена как

$$Z = N_{1(0)} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_{2(0)} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2S_{(0)} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}.$$

Для дальнейшего анализа примем $X = Y = 0$ и отметим, что сжимающие усилия $N_{1(0)}$, $N_{2(0)}$ являются положительными.

Примем, что по граням прямоугольной пластинки приложены равномерно распределенные погонные усилия p_1 , p_2 . Из условия статического равновесия получим

$$N_{1(0)} = p_1 = p, \quad N_{2(0)} = p_2 = \alpha p, \quad S_{(0)} \equiv 0, \quad (12)$$

где α — коэффициент, учитывающий характер внешней нагрузки.

Задача на устойчивость сводится к определению критических значений нагрузок, при которых возможно появление новых форм равновесия. Для этого рассматривается устойчивость основной формы равновесия при малых возмущениях. При этом деформации пластинки предполагаются упругими при критических значениях нагрузки.

Используя статические, геометрические уравнения тонких упругих прямоугольных пластинок (5), (6) и формулы (11), получим следующую систему дифференциальных уравнений устойчивости относительно компонентов вектора перемещений точек срединной поверхности обшивки u , v , w :

$$\begin{aligned} L_{11}(u) + L_{12}(v) + L_{13}(w) &= 0, \\ L_{21}(u) + L_{22}(v) + L_{23}(w) &= 0, \\ L_{31}(u) + L_{32}(v) + L_{33}(w) &= 0, \end{aligned} \quad (13)$$

где дифференциальные операторы имеют вид:

$$\begin{aligned} L_{11} &= c_{11} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + c_{55} \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \quad L_{12} = (c_{12} + c_{55}) \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}, \\ L_{13} &= -c_{13} \frac{\partial^3}{\partial x^3} - (c_{14} + c_{56}) \frac{\partial^3}{\partial x \partial y^2}, \quad L_{21} = (c_{21} + c_{55}) \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}, \\ L_{22} &= c_{55} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + c_{22} \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \quad L_{23} = -c_{24} \frac{\partial^3}{\partial y^3} - (c_{23} + c_{56}) \frac{\partial^3}{\partial x^2 \partial y}, \end{aligned}$$

$$L_{31} = -c_{31} \frac{\partial^3}{\partial x^3} + (c_{65} + c_{75} - c_{41}) \frac{\partial^3}{\partial x \partial y^2},$$

$$L_{32} = -c_{42} \frac{\partial^3}{\partial y^3} + (-c_{32} + c_{65} + c_{75}) \frac{\partial^3}{\partial x \partial y^2},$$

$$L_{33}^{\bullet} = c_{33} \frac{\partial^4}{\partial x^4} + (c_{34} - c_{66} - c_{76} - c_{43}) \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + c_{44} \frac{\partial^4}{\partial y^4} + N_{1(0)} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + N_{2(0)} \frac{\partial^2}{\partial y^2}.$$

Полученная система при неучете ребер жесткости переходит в уравнения для сплошной пластинки, а при удалении обшивки — в уравнения для сетчатой пластинки. Следует отметить, за поверхность приведения может быть выбрана другая поверхность.

Компоненты линейной и изгибной деформации можно найти из уравнений системы (11). Получены формулы определения деформаций, усилий и моментов в обшивке и ребрах пластинки.

Рассмотрим устойчивость прямоугольной ребристой пластинки с шарнирным опиранием по контуру.

Условиям шарнирного опирания соответствует

$$v = 0, \quad w = 0; M_1 = 0 \quad \text{при } x = 0, l_1;$$

$$u = 0, \quad w = 0; M_2 = 0 \quad \text{при } y = 0, l_2.$$

Если длины сторон l_1 и l_2 пластинки сравнимы между собой, то выражение, описывающее изогнутую срединную поверхность пластинки, потерявшей устойчивость, необходимо принять в следующей форме:

$$\begin{aligned} u &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \cos \frac{m\pi}{l_1} x \sin \frac{n\pi}{l_2} y, \\ v &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} B_{mn} \sin \frac{m\pi}{l_1} x \cos \frac{n\pi}{l_2} y, \\ w &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{mn} \sin \frac{m\pi}{l_1} x \sin \frac{n\pi}{l_2} y, \end{aligned} \quad (14)$$

где m — число полуволн, образующихся по оси x , а n — по оси y .

Зависимости (14) внесем в уравнения устойчивости (13), получим систему линейных однородных уравнений относительно произвольных постоянных.

$$A_{mn} a_{11} + B_{mn} a_{12} + C_{mn} a_{13} = 0,$$

$$A_{mn} a_{21} + B_{mn} a_{22} + C_{mn} a_{23} = 0,$$

$$A_{mn} a_{31} + B_{mn} a_{32} + C_{mn} a_{33}^{\bullet} = 0. \quad (15)$$

Коэффициенты этих уравнений выражаются следующими равенствами:

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= c_{11} \left(-\frac{m^2 \pi^2}{l_1^2} \right) + c_{55} \left(-\frac{n^2 \pi^2}{l_2} \right), \quad a_{13} = -c_{13} \left(\frac{m^3 \pi^3}{l_1^3} \right) - (c_{14} + c_{56}) \left(-\frac{m\pi n^2 \pi^2}{l_1 l_2^2} \right), \\
 a_{21} = a_{12} &= (c_{21} + c_{55}) \left(-\frac{m\pi n\pi}{l_1 l_2} \right), \quad a_{22} = c_{55} \left(-\frac{m^2 \pi^2}{l_1^2} \right) + c_{22} \left(-\frac{n^2 \pi^2}{l_2} \right), \\
 a_{23} &= -c_{24} \left(-\frac{n^3 \pi^3}{l_2^3} \right) - (c_{23} + c_{56}) \left(-\frac{m^2 \pi^2 n\pi}{l_1^2 l_2} \right), \\
 a_{31} &= -c_{31} \left(-\frac{m^3 \pi^3}{l_1^3} \right) + (c_{65} + c_{75} - c_{41}) \left(-\frac{m\pi n^2 \pi^2}{l_1 l_2^2} \right), \\
 a_{32} &= -c_{42} \left(\frac{n^3 \pi^3}{l_1^3} \right) - (c_{32} + c_{65} + c_{75}) \left(\frac{m^2 \pi^2 n\pi}{l_1^2 l_2} \right), \\
 a_{33} &= c_{33} \left(\frac{m^4 \pi^4}{l_1^4} \right) + (c_{34} - c_{66} - c_{76} - c_{43}) \left(\frac{m\pi n^2 \pi^2}{l_1 l_2^2} \right) + c_{44} \frac{n^4 \pi^4}{l_2^4}, \\
 a_{33}^{\bullet} &= a_{33} + N_{1(0)} \frac{m^2 \pi^2}{l_1^2} + N_{2(0)} \frac{n^2 \pi^2}{l_2^2}.
 \end{aligned}$$

Так как пластинка рассматривается при новой форме равновесия, отличающейся от первоначальной, то величины A_{mn} , B_{mn} , C_{mn} не могут быть равными нулю.

В силу этого должен обращаться в нуль определитель системы уравнений (15):

$$\begin{vmatrix} a_{11} a_{12} a_{13} \\ a_{21} a_{22} a_{23} \\ a_{31} a_{32} a_{33}^{\bullet} \end{vmatrix} = 0. \quad (16)$$

Рассмотрим случай пропорционального возрастания нагрузок по α , тогда из (16) с учетом (12) получим следующие характеристические уравнения:

$$p = \beta \left(\frac{b_1}{b_2} - a_{33} \right), \quad (17)$$

где $b_1 = a_{11} a_{23} a_{32} - a_{12} a_{23} a_{31} - a_{13} (a_{21} a_{32} - a_{22} a_{31})$, $b_2 = a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}$,

$$\beta = \frac{1}{m^2 \pi^2 / l_1^2 + \alpha n^2 \pi^2 l_2^2}.$$

Для отыскания наименьшего значения критической нагрузки $p_{кр}$ при заданных параметрах пластинки требуется минимизировать величину p по m и n .

Заметим, что формула (17) может быть использована и при других сетках подкрепления пластины, образованных ребрами одного, двух или трех

семейств. При исследовании пластинок, подкрепленной одинаковыми ребрами, оси которых образуют равносторонние треугольники, можно использовать теорию изотропных пластинок и полученные решения многочисленных задач [9, 10, 15].

Для пластинок с заданным типом сетки подкрепления, отношением сторон пластинки, отношением между нагрузками и достаточно широким диапазоном изменения параметров сетки можно провести анализ форм потери устойчивости и найти значения m и n , при которых критическая нагрузка принимает наименьшее значение.

Анализ форм потери устойчивости при принятом диапазоне изменения параметров позволит сделать важные выводы о рациональности топологии подкрепленной пластинки с точки зрения расхода материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мануйлов Г. А., Косицын С. Б., Безичев М. М. Исследования устойчивости упругих пластин и оболочек при помощи конечно-элементного моделирования // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2011. № 1. С. 58—65.
2. Галишикова В. В., Игнатьев В. А. Регулярные стержневые системы (Теория и методы расчета). Волгоград : ВолГАСУ, 2006. 552 с.
3. Mittelstedt Ch., Schagerl M. A composite view on Windenburg's problem: Buckling and minimum stiffness requirements of compressively loaded orthotropic plates with edge reinforcements // International Journal of Mechanical Sciences. 2010. Vol. 52. Iss. 3. Pp. 471—484.
4. Yang D.-B., Zhang Y.-G. and Wu J.-Z. Hangai Prize Papers for 2010: A method for the Damage Assessment of Single-Layer Latticed Shells by Performing Static Stability Analysis Twice // Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures. 2010. 51 (4). Pp. 281—290.
5. Yuhua Tang, Xinwei Wang. Buckling of symmetrically laminated rectangular plates under parabolic edge compressions // International Journal of Mechanical Sciences. 2011. 53. № 2. С. 91—97.
6. Qulin Zhang, Hailin Tang, Yage Wu. Effective section calculation of aluminium plate assemblies under uniform compression considering interactive local buckling // Heron. 2010. Vol. 55. № 3-4. Pp. 235—250.
7. Kheirikhah M. M., Khalili S. M. R., Malekzadeh Fard K. Biaxial buckling analysis of soft-core composite sandwich plates using improved high-order theory // European Journal of Mechanics A-solids. 2012. 31. № 1. Pp. 54—56. DOI: [10.1016/j.euromechsol.2011.07.003](https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2011.07.003)
8. Dias M. A., Hanna J. A., Santangelo C. D. Programmed buckling by controlled lateral swelling in a thin elastic sheet // Physical Review E. 2011. 84(3), p. 036603.
9. Пишеничнов Г. И. Теория тонких упругих сетчатых оболочек и пластинок. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. 352 с.
10. Беликов Г. И. Статика, динамика и устойчивость сетчатых и подкрепленных оболочек с учетом поперечного сдвига. Волгоград, 2003. 298 с.
11. Беликов Г. И. Исследование устойчивости сетчатых пластинок // Сб. статей X Международной научно-технической конференции МНИЦ ПГСХФ — Пенза. РИО ПГСХФ, 2009. С. 26—30.
12. Беликов Г. И. Общий случай изгиба прямоугольной сетчатой пластины с учетом растягивающих сил, действующих в срединной поверхности // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия : Строительство и архитектура. 2014. Вып. 37(56). С. 121—128.
13. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. М. : Физматгиз, 1967. 984 с.
14. Тимошенко С. П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. М. : Физматгиз, 1971. 799 с.
15. Wright D. Membrane forces and buckling in Retigulated Shells // Journal of the Structural Division. Proceeding of the American Society of Civil Engineering. 1965. Vol. 91. № ST 1. Pp. 173—201.164.

© Беликов Г. И., Журбина Е. И., Алексиков С. В., 2015

Поступила в редакцию
в марте 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Беликов Г. И., Журбина Е. И., Алексиков С. В. Устойчивость тонких упругих подкрепленных пластинок в мостовых конструкциях // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 40(59). С. 186—196.

Об авторах:

Беликов Георгий Иванович — д-р техн. наук, доц. кафедры сопротивления материалов, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Журбина Екатерина Игоревна — старший преподаватель кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, zhurbina_k@mail.ru

Алексиков Сергей Васильевич — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, AL34rus@mail.ru

G. I. Belikov, E. I. Zhurbina, S. V. Aleksikov

STABILITY OF THIN REINFORCED ELASTIC PLATES IN BRIDGE CONDUITS

The problem of the stability of a thin reinforced elastic plate based on a continual design scheme is considered in the article. A detailed derivation of the basic linearized equation of the theory of rectangular plate stability is provided. Considered is the analytical method of solution of the basic equation of stability under compression of the plate on the faces of distributed load of constant intensity. Solutions for the plate streamlining in terms of material consumption are offered.

Key words: stability, reinforced plate, continual design schemes, streamlining of plate topology.

REFERENCES

1. Manuilov G. A., Kositsyn S. B., Begichev M. M. [The investigation of stability of elastic plates and shells with the help of FE modeling]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksii i sooruzhenii* [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings], 2011. no. 1, pp. 58—65.
2. Galishnikova V. V., Ignat'ev V. A. *Regulyarnye sterzhnevye sistemy (Teoriya i metody rascheta)* [Regular bar systems (Theory and calculation methods)]. Volgograd, VSUACE Publ., 2006. 552 p.
3. Mittelstedt Ch., Schagerl M. A composite view on Windenburg's problem: Buckling and minimum stiffness requirements of compressively loaded orthotropic plates with edge reinforcements. *International Journal of Mechanical Sciences*, 52 (3), pp. 471—484.
4. Yang D.-B., Zhang Y.-G. and Wu J.-Z. Hangai Prize Papers for 2010: A method for the Damage Assessment of Single-Layer Latticed Shells by Performing Static Stability Analysis Twice. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 2010, 51 (4), pp. 281—290.
5. Yuhua Tang, Xinwei Wang. Buckling of symmetrically laminated rectangular plates under parabolic edge compressions. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2011, 53(2), pp. 91—97.
6. Qulin Zhang, Hailin Tang, Yage Wu. Effective section calculation of alluminium plate assemblies under uniform compression considering interactive local buckling. *Heron*, 2010, 55(3-4), pp. 235—250.
7. Kheirikhah M. M., Khalili S. M. R., Malekzadeh Fard K. Biaxial buckling analysis of soft-core composite sandwich plates using improved high-order theory. *European Journal of Mechanics A-solids*, 2012, 31(1), pp. 54—56. DOI: [10.1016/j.euromechsol.2011.07.003](https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2011.07.003)
8. Dias M. A., Hanna J. A., Santangelo C. D. Programmed buckling by controlled lateral swelling in a thin elastic sheet. *Physical Review E*, 2011, 84(3), p. 036603.
9. Pshenichnov G. I. *Teoriya tonkikh uprugikh setchatykh obolochek i plastinok* [Theory of thin elastic mesh membranes and plates]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 352 p.

10. Belikov G. I. *Statika, dinamika i ustoichivost' setchatykh i podkreplennykh obolochek s uchetom poperechnogo sdviga* [Statics, dynamics and stability of mesh and reinforced membrane taking into account the transverse shear]. Volgograd, 2003. 298 p.

11. Belikov G. I. [Investigation of the stability of mesh plates]. *Sb. statei Kh Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii MNITs PGSKhF — Penza. RIO PGSKhF* [Proc. articles of X International Scientific and Technical Conference of ISRC PGSKhF — Penza]. RIO PGSKhF, 2009. Pp. 26—30.

12. Belikov G. I. [General case of rectangular lattice plate bending considering tension force acting in middle surface]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2014, iss. 37(56), pp. 121—128.

13. Vol'mir A. S. *Ustoichivost' deformiruemykh sistem* [Stability of deformable systems]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1967. 984 p.

14. Timoshenko S. P. *Ustoichivost' sterzhnei, plastin i obolochek* [Stability of rods, plates and membranes]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1971. 799 p.

15. Wright D. Membrane forces and buckling in Retigulated Shells. *Journal of the Structural Division. Proceeding of the American Society of Civil Engineering*, 1965, 91(ST 1), pp. 173—201.164.

For citation:

Belikov G. I., Zhurbina E. I., Aleksikov S. V. [Stability of thin reinforced elastic plates in bridge conduits]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 40(59), pp. 186—196.

About authors:

Belikov Georgii Ivanovich — Doctor of Engineering Science, Docent of Resistance of Materials Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

Zhurbina Ekaterina Igorevna — Senior Lecturer of Engineering Structures, Foundations and Safety of Constructions Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, zhurbina_k@mail.ru

Aleksikov Sergei Vasil'evich — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Construction and Operation of Transport Works Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, AL34rus@mail.ru

УДК 624.046.5:004.942:691.327

А. Ю. Чаускин, В. А. Пшеничкина

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ МЕТОДОМ XFEM С УЧЕТОМ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ НЕОДНОРОДНОГО МАТЕРИАЛА

Выполнен расчет бетонного образца на сжатие с помощью математического моделирования расширенным методом конечных элементов (XFEM). Проведен анализ трещинообразования методами механики хрупкого разрушения неоднородного тела. Получены значения средней кубиковой прочности образца и коэффициенты вариации.

Ключевые слова: механика разрушения, трещинообразование, XFEM, бетон, статистический характер.

Одной из важнейших задач в области строительства является повышение надежности и долговечности строительных конструкций, а также оценка живучести зданий и сооружений, в частности из железобетона — одного из наиболее распространенных материалов, используемых в строительстве. Существующие эмпирические методы, решающие подобные задачи, весьма трудоемкие, дорогостоящие и не всегда приводят к цели.

В середине XX века появляется современное научное направление — механика разрушения, в задачи которой входит улучшение механических свойств материалов различного назначения и оценка развития напряженно-деформированного состояния при наличии повреждений (трещины или системы трещин) в конструкции (элементе системы) при различных видах воздействий. Данный подход обоснован тем, что в любом теле имеются дефекты различного рода и происхождения (возникновение дефектов во время изготовления элемента/изделия или во время эксплуатации). Можно выделить два основных рода дефектов: дефекты 1-го рода — округлые дефекты (например, поры); дефекты 2-го рода — трещины или система трещин (трещина соизмерима с размером наибольшего структурного элемента в рассматриваемом материале).

В настоящее время имеется множество теорий механики, но следует выделить основные для хрупкого разрушения:

1. Энергетический подход (А. Гриффитс): рост трещины должен быть энергетически выгодным процессом (при котором количество запасенной в теле энергии уменьшается). Основан на законе сохранения и превращения энергии. Высвобожденная энергия деформации U и энергия образования двух новых поверхностей тела (трещины) G равны:

$$U = \pi \sigma^2 l^2 / (2E), \quad (1)$$

$$G = 2l\gamma, \quad (2)$$

где σ — напряжение; E — модуль упругости 1-го рода; l — длина трещины; γ — удельная плотность поверхности энергии.

Из уравнений (1) и (2) следует, что количество энергии, высвобождаемой при развитии трещины, пропорционально квадрату длины трещины, тогда как количество энергии, расходуемой на образование новых поверхностей трещины, пропорционально первой степени длины трещины, т. е. чем длиннее трещина, тем больше роль высвобождаемой энергии.

2. Силовой метод: основан на условии равновесия действующих на трещину внешних (нагрузки) и внутренних сил (силы межатомного/межмолекулярного сцепления). Данный метод и энергетический эквивалентны: они оба дают одинаковые результаты. Особое место в силовом методе занимает вершина трещины — исходная точка с наибольшей концентрацией напряжений и дальнейшего разрушения материала. Формулируя критерий локального разрушения тела, начало распространения трещины, нужно сравнивать не сами напряжения σ , а величину:

$$\lim_{s \rightarrow 0} (\sigma \sqrt{s}), \quad (3)$$

где s — малое расстояние по линии трещины от ее вершины до некоторой точки, где действуют напряжения σ .

Предел (3) в механике разрушения получил название «коэффициент интенсивности напряжений (K)» и имеет размерности:

$$[FL^{-3/2}] = \text{Н}/(\text{м})^{\frac{3}{2}}.$$

Поля деформации и напряжений у вершины трещины получаются путем комбинации трех основных типов деформации (и соответствующие им коэффициенты интенсивности напряжений):

тип 1 (K_I) — отрыв, поверхности трещины расходятся в противоположных направлениях:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi l}; \quad (4)$$

тип 2 (K_{II}) — поперечный сдвиг;

тип 3 (K_{III}) — продольный сдвиг.

Бурный рост ЭВМ и появление метода конечных элементов (FEM) позволило решать сложные задачи механики разрушения, и все же до 1999 г. оставалась нерешенной проблема явного моделирования развития трещины и конструкции в целом из-за несовершенства метода конечных элементов. При оценке и наблюдении роста трещины в модели требовалась операция перестраивания конечно-элементной сетки на каждом этапе расчета (англ. «remeshing»), затрагивающая матрицу жесткостей.

В 1999 г. американским ученым инженером-механиком Т. Белитчко и его группой был усовершенствован метод конечных элементов, который назван расширенным методом конечных элементов (англ. Extended finite element method — XFEM). Данный метод сохраняет все преимущества метода конечных элементов и устраняет некоторые недостатки: в задачах, где имеет быть существование трещины, в уравнении равновесия конечных элементов матрица жесткости не затрагивается, модифицируется только вектор правой

части уравнения, что исключает долговременный процесс операции перестраивания конечно-элементной сетки (рис. 1) [1]. Вектор перемещений описывается в следующем виде:

$$u = \sum_{I=1}^N N_I(x)[u_I + H(x)a_I + \sum_{\alpha=1}^4 F_{\alpha}(x)b_I^{\alpha}], \quad (5)$$

где $N_I(x)$ — функция формы; u_I — вектор перемещения узлов; $H(x)$ — ступенчатая функция; a_I — свободный вектор генерации узлов; $F_{\alpha}(x)$ — асимптотическая функция вершины трещины; b_I^{α} — свободный вектор генерации узлов.

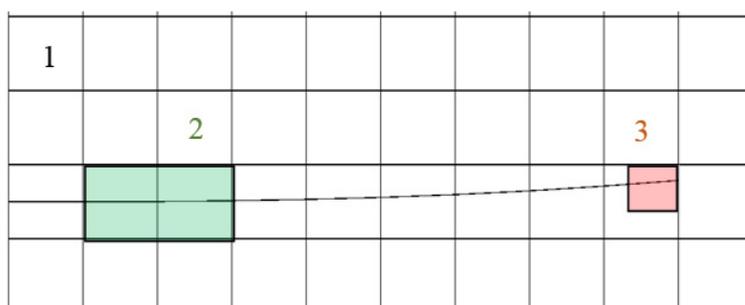


Рис. 1. Иллюстрация XFEM в конечно-элементной модели: 1 — $N_I(x)u_I$ — относится ко всем узлам в модели; 2 — $H(x)a_I$ — относится к узлам, которые формируются функцией разрыва (начало трещины); 3 — $\sum_{\alpha=1}^4 F_{\alpha}(x)b_I^{\alpha}$ — относится к узлам, которые формируются функцией разрыва (вершина трещины)

На стыке развития механики разрушения и ЭВМ с методами строительной механики в настоящее время имеется возможность глубокого изучения проблем механики разрушения с помощью математического моделирования, а также оценки живучести отдельных элементов или системы в целом с имеющимися дефектами.

Рассмотрим контрольный образец из бетона со следующими характеристиками¹:

1. Вид образца: куб с длиной ребра 15 см.
2. Класс бетона: В25.
3. Гарантированная марка цемента М300 (ПЦ-Д0) в возрасте 28 сут. при естественном твердении: на сжатие 29,4 МПа; при растяжении/изгибе 4,4 МПа².

¹ ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М., 2013.

ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. М., 1993.

² ГОСТ 10178-85. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия. М., 1987.

4. Номинальный размер зерен заполнителя с содержанием в образце: 10...20 мм, 50 %, при этом считаем, что наиболее вероятные и опасные трещины образуются на наиболее крупном заполнителе, форма заполнителя — круглая. Принято следующее распределение по площади заполнителя и его количество:

33,33 % (3750 мм²) — 10 мм — 47 шт.

33,33 % (3750 мм²) — 15 мм — 21 шт.

33,34 % (3750 мм²) — 20 мм — 12 шт.

По сравнению с механикой разрушения однородных (квазиоднородных) тел механика разрушения неоднородных материалов исследована гораздо меньше, поэтому для решения задачи используем ряд упрощенных гипотез:

1. В неоднородном теле, даже при отсутствии трещин, характер распределения напряжения существенно отличается от распределения в однородном.

2. В неоднородном теле трещины могут распространяться не только в одном из составляющих тела, но и по их контактной зоне, т. е. если трещиностойкость контактной зоны недостаточна, то трещина будет распространяться из одного компонента тела по контактной зоне к другому.

Приняты следующие ориентировочные значения критических коэффициентов интенсивности напряжений K_{Ic} и K_{IIc} (табл. 1) [2, 3]:

Т а б л и ц а 1

Ориентировочные значения K_{Ic} и K_{IIc} , характеризующие трещиностойкость компонентов структуры бетона

Компоненты бетона	$K_{Ic}, \text{МН}/(\text{м})^{-\frac{3}{2}}$	$K_{IIc}, \text{МН}/(\text{м})^{-\frac{3}{2}}$
Матрица — цементный камень (М)	1,0	3,0
Заполнитель (З):		
плотный	1,0	3,0
пористый	0,1	0,3
Контактная зона при заполнителе (К):		
плотном	0,5	0,65
пористом	1,0	1,0

Основываясь на этой таблице, можно сделать классификацию возможных типов разрушения:

1. М-разрушение — трещины проходят только через матрицу (может быть получена только на образцах без крупного заполнителя).

2. МЗ-разрушение — трещины проходят через матрицу и заполнитель (характерно для пористых заполнителей).

3. К-разрушение — трещины развиваются вокруг заполнителей (обычные бетоны).

4. МЗК-трещины проникают из матрицы и в заполнитель, и по контактной зоне (высокопрочные бетоны).

Для нашей задачи принимаем условие равнопрочности матрицы и заполнителя. Размерность структуры образца — макроструктура, т. е. размер элементов структуры порядка 20 мм, что дает основания пользоваться обычным для механики сплошной среды приемом «размазывания» (поведение материала с неоднородностями заменяется влиянием однородного тела).

Из ранее проведенных экспериментов [4, 5] условно принято, что разрушение материала целиком определяется макротрещинами контактной зоны матрицы и заполнителя, при этом в математической модели принимается заполнитель круглой формы с устойчивым ($\theta_0 = \pi/4$) или неустойчивым ($\theta_0 = \pi/6$) ростом трещины в контактной зоне. Матрицу с микротрещинами следует принимать квазиоднородной.

Моделирование контрольного образца производилось в ПК «Abaqus 6.13» со следующими исходными данными [6—9]:

1. Данные препроцессора:

1.1. Модель тела бетона (имя Concrete) с размерами сторон 150×150 мм, в виде плоскости (тип Shell planar), толщина (Plane stress/strain thickness) 150.

1.2. Сечение тела (Sections): категория (Category) — твердое тело, тип — однородное (Homogeneous).

1.3. Модель макротрещин образца (имя Crack) сгенерирована случайным образом и задана в виде линий (тип Wire).

1.4. Материал тела бетона (имя M_Concrete).

1.4.1. Плотность (Density): не задается по причине малого влияния веса на результат.

1.4.2. Механические свойства: упругий (Elastic); начальный модуль упругости бетона E_b (Young's Modulus) 30000 (Н/мм²); коэффициент Пуассона ν (Poisson's Ratio) $0,2$; модуль упругости второго рода G (Shear Modulus) задается автоматически, включение условия недопустимости растяжения.

1.4.3. Закон механики разрушения для материала (Damage for Traction Separation Laws): закон для формулировки задачи XFEM по напряжениям (Maxps Damage); отклонение (Tolerance) 1% ; максимальное напряжение в вершине трещины матрицы (Max Principal Stress) $4.4e-001$ (Н/мм²).

1.4.4. Дополнительные данные моделируемого закона механики разрушения: решение задачи силовым методом (Mixed mode behavior — Power Law) со следующими данными [4]:

энергия разрушения при деформации отрыва (Normal Mode Fracture Energy): 1 ;

энергия разрушения при поперечном сдвиге (Shear Mode Fracture Energy First Direction): 1 ;

энергия разрушения при продольном сдвиге (Shear Mode Fracture Energy Second Direction): 1 .

1.5. Сборка схемы (Assembly): модель «Concrete» — независимый тип (Independent); модель «Crack» — зависимый тип (dependent).

1.6. Взаимодействие (Interactions): создание взаимодействия модели трещины «Crack» с моделью тела «Concrete» по типу XFEM (имя Crack_growth). Данное взаимодействие включается в расчет на этапе инициализации.

1.7. Граничные условия (BCs): принимаем нижнюю грань модели неподвижно закрепленную (запрет на линейные перемещения X-Y и поворот UZ).

1.8. Нагрузки (Loads): равномерно распределенная, возрастающая от 0 до бесконечности, приложенная к верхней грани в сторону грани с граничными условиями.

1.9. Разбивка элемента на конечные элементы (Mesh): разбивка производится только для тела образца; тип элемента — четырехугольник (CPS4R: A 4-node bilinear plane stress quadrilateral, reduced integration, hourglass control). Размер аппроксимации 3 (для данной модели 2500 конечных элементов).

2. Данные процессора (решатель):

2.1. Входные данные этапов расчета (Steps):

этап инициализации (Initial) — данные по умолчанию;

этап статического расчета (Static, General) — начальная величина прироста (initial) 0.001; минимальный шаг 0.0001; максимальный шаг 1.

2.2. Постановка задачи (Job): данные по умолчанию, за исключением использования мультипоточного расчета.

3. Данные постпроцессора:

3.1. Вывод результатов (Field Output Requests): данные по умолчанию, за исключением включения результатов анализа включения конечных элементов в метод расчета XFEM.

Результаты расчета:

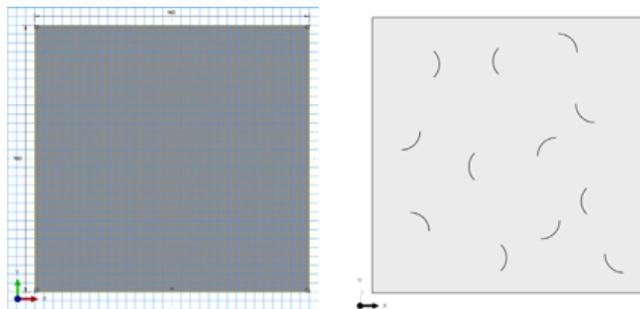


Рис. 2. Вид образца и его трещин

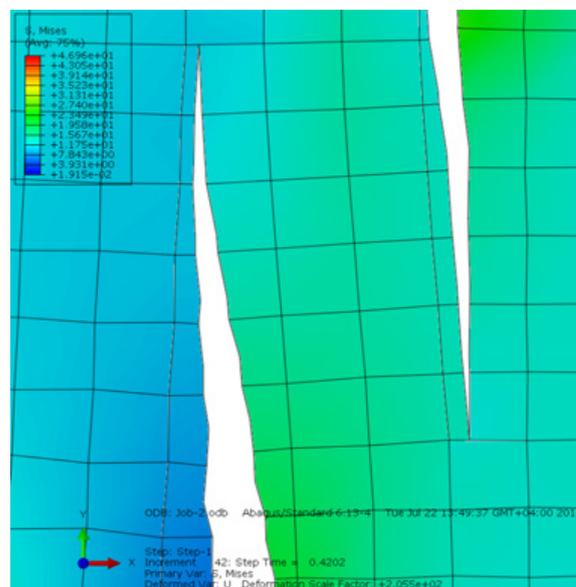


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние в образце: нагрузка в 12,61 МПа. Раскрытие трещины и КЭ-сетка при использовании XFEM

Анализ результатов расчета. Перед началом создания математической модели определяем наиболее и наименее вероятные случаи комбинации трещин в математическом смысле, наилучшие и наилучшие случаи в физическом смысле [10, 11].

Математический смысл (по вероятности): появление одной трещины одного типа следует рассматривать как логическое «да», т. е. «1», а ее отсутствие как логическое «нет» — «0». Моделируя случайные появления этих трещин в ПК «Mathcad Prime 3.0», получаем Гауссово распределение вероятностей P появления определенного количества трещин (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Вероятность реализации определенного количества трещин

Количество трещин, шт.	P , %	Количество трещин, шт.	P , %
0	0,02	7	18,61
1	0,46	8	12,11
2	2,23	9	6,53
3	5,87	10	2,23
4	12,61	11	0,33
5	18,70	12	0,02
6	20,28		

Из табл. 2 следует, что наиболее вероятное количество трещин 6 шт. с вероятностью появления 20,28 %. Учитывая, что максимальная и минимальная сумма трещин в данном эксперименте составляет 12 и 1 соответственно, находим возможные комбинации сумм трещин трех типов ($\pi/3$, $\pi/4$, $\pi/6$). В результате получаем максимальную вероятность при комбинации (4, 4, 4) — 0,2 %, и близкие к ней (5, 4, 3) — 0,138 % и (5, 5, 2) — 0,078 %. Также рассматриваем и очень маловероятные варианты комбинаций: (12, 0, 0), (1, 0, 0). В табл. 3 представлены рассматриваемые варианты комбинаций от наиболее вероятной к наименее.

Т а б л и ц а 3

Варианты рассматриваемых комбинаций по вероятности

№ варианта	1	2	3	4	5
$\pi/3$	4	5	5	12	1
$\pi/4$	4	4	5	0	0
$\pi/6$	4	3	2	0	0

Физический смысл (по качеству): из результатов вероятности появления тех или иных комбинаций стоит обратить внимание, что комбинация (4, 4, 4) не имеет вариантов перестановки и никак не влияет на худший или лучший случай в физическом смысле, при этом комбинация (5, 4, 3) имеет $3! = 6$ комбинаций, которые равновероятны, но будут обладать разным влиянием на конечный результат. На табл. 4 представлены рассматриваемые варианты комбинаций по качеству.

Т а б л и ц а 4

Варианты рассматриваемых комбинаций по качеству

№ варианта (табл. 3)	1	2						3			4			5		
№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$\pi/3$	4	5	5	4	4	3	3	5	5	2	12	0	0	1	0	0
$\pi/4$	4	4	3	5	3	5	4	5	2	5	0	12	0	0	1	0
$\pi/6$	4	3	4	3	5	4	5	2	5	5	0	0	12	0	0	1
$P, \%$	0,2	0,138						0,078			8e-012			8e-012		

Комбинации, представленные в табл. 4, вводим в математическую модель. В математическом эксперименте трещины по каждой комбинации располагаем по образцу случайным образом два раза. В результате было создано 32 модели образца со случайным расположением включений (один из них представлен в результатах) в разных комбинациях количества и типа трещин. Получены следующие данные по разрушающей нагрузке (табл. 5).

Т а б л и ц а 5

Разрушающая нагрузка при разных вариантах комбинаций и случайного расположения трещин

№ варианта (по вероятности)	№ варианта (по качеству)	№ расположения трещин	Разрушающая нагрузка P_{\max} , МПа	Среднее значение \bar{P}_{\max} , МПа	$P, \%$		
1	1	1	22,57	23,24	0,2		
		2	23,91				
2	2	1	22,53	22,13	0,138		
		2	21,72				
	3	1	22,85	22,49			
		2	22,12				
	4	1	23,01	22,75			
		2	22,49				
	5	1	22,82	22,96			
		2	23,09				
	6	1	23,97	24,16			
		2	24,35				
	7	1	25,03	24,62			
		2	24,21				
	3	8	1	22,40		21,63	0,078
			2	20,13			
9		1	22,71	23,15			
		2	23,60				
10		1	25,11	24,72			
		2	24,32				

Окончание табл. 5

№ варианта (по вероятности)	№ варианта (по качеству)	№ расположения трещин	Разрушающая нагрузка P_{\max} , МПа	Среднее значение \bar{P}_{\max} , МПа	P , %
4	11	1	19,13	18,34	8e-012
		2	17,55		
	12	1	25,52	24,44	
		2	23,36		
	13	1	24,98	25,34	
		2	25,69		
5	14	1	27,52	27,95	8e-012
		2	28,37		
	15	1	28,94	28,43	
		2	27,91		
	16	1	29,57	29,30	
		2	29,03		

Анализируя полученные результаты, проводим серию экспериментов в количестве 30 для наиболее вероятного и среднего значения среди полученных в табл. 5 — варианта № 1 и наиболее близкого к реальным данным по натурным испытаниям — варианта № 16. В результате было получено среднее значение для варианта № 1 — 23,54 МПа, и 29,64 МПа для варианта № 16. Найдем коэффициенты вариации для данных комбинаций, предварительно получив математическое ожидание, дисперсию и стандарт [10]:

математическое ожидание:

$$M(x_1) = \bar{P}_{\max} = \bar{R} = 23,54 \text{ (МПа)},$$

$$M(x_{16}) = \bar{P}_{\max} = \bar{R} = 29,64 \text{ (МПа)},$$

дисперсия:

$$D_R(x_1) = D_P(x_1) = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} P_{\max,i}^2 - \bar{P}_{\max} = 0,343,$$

$$D_R(x_{16}) = D_P(x_{16}) = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} P_{\max,i}^2 - \bar{P}_{\max} = 1,02,$$

стандарт:

$$\sigma_R(x_1) = \sigma_P(x_1) = \sqrt{D_R(x_1)} = 0,586,$$

$$\sigma_R(x_{16}) = \sigma_P(x_{16}) = \sqrt{D_R(x_{16})} = 1,02,$$

коэффициент вариации:

$$V_{R1} = \frac{\sigma_R(x_1)}{\bar{R}} = 0,025,$$

$$V_{R16} = \frac{\sigma_R(x_{16})}{\bar{R}} = 0,035.$$

При натурных испытаниях средняя кубиковая прочность бетона класса В25 составляет:

$$\text{при } V = 0,135 \quad \bar{R}_{fac} = 32,11 \text{ (МПа),}$$

$$\text{при } V = 0,05 \quad \bar{R}_{fac} = 27,23 \text{ (МПа).}$$

Учитывая требования ГОСТ 10180-2012, принимаем $\bar{R}_{fac} = 27,23$ МПа. Сравнение полученных моделированием и соответствующих классу бетона В25 значений средней кубиковой прочности показывает, что учет наиболее вероятного распределения трещин в образце (вариант 1) приводит к снижению средней прочности на 13,6 %. Для варианта 16 (1 устойчивая трещина) оценка прочности превысила \bar{R}_{fac} на 8,1 %. Наиболее низкое значение прочности образца получено для варианта 11 (12 неустойчивых трещин) с малой вероятностью реализации.

Рассмотренный метод математического моделирования разрушения бетонных кубиков расширенным методом конечных элементов позволяет учесть влияние различных вариантов трещинообразования в зависимости от технологического процесса приготовления образца на величину прочности бетона. При переходе от плоской постановки задачи к объемному напряженно-деформированному состоянию образца возможно уточнение результатов расчета при сохранении качественных показателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Belytschko T., Moes N., Dolbow J. A finite element method for crack growth without remeshing // International journal for numerical methods in engineering. 1999. 46. Pp. 131—150.
2. Зайцев Ю. В. Механика разрушения для строителей: учеб. пособие для строит. вузов. М.: Высш. шк., 1991. 288 с.
3. Мураками Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. М.: Мир, 1990. 448 с.
4. Зайцев Ю. В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушений. М.: Стройиздат, 1982. 196 с.
5. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
6. Abaqus 6.13 Documentation. Dassault Systemes.
7. Abaqus/CAE User's Guide. Dassault Systemes.
8. Abaqus Analysis User's Guide. Dassault Systemes.
9. Zhen-zhong Du. eXtended Finite Element Method (XFEM) in Abaqus. Dassault Systemes.
10. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.
11. Пугачев В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. М., 1960. 842 с.

© Чаускин А. Ю., Пшеничкина В. А., 2015

Поступила в редакцию
в марте 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Чаускин А. Ю., Пшеничкина В. А. Математическое моделирование задач механики разрушения методом XFEM с учетом стохастической природы неоднородного материала // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 40(59). С. 197—207.

Об авторах:

Чаускин Андрей Юрьевич — аспирант кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, a.chauskin@gmail.com

Пшеничкина Валерия Александровна — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, rap_hm@list.ru

A. Yu. Chauskin, V. A. Pshenichkina

MATHEMATICAL MODELING OF FRACTURE MECHANICS PROBLEMS BY XFEM METHOD TAKING INTO ACCOUNT STOCHASTIC NATURE OF INHOMOGENEOUS MATERIAL

The calculation of the concrete specimen for compression by means of mathematical modeling by the extended finite element method (XFEM) is performed. The analysis of cracking by the methods of mechanics of brittle fracture of inhomogeneous body is carried out. The values of the average cube strength of the sample and the coefficients of variation are received.

Key words: fracture mechanics, cracking, XFEM, concrete, stochastic nature.

REFERENCES

1. Belytschko T., Moes N., Dolbow J. A finite element method for crack growth without remeshing. *International journal for numerical methods in engineering*, 1999, 46, pp. 131—150.
2. Zaytsev Yu. V. *Mekhanika razrusheniya dlya stroitelei: ucheb. posobie dlya stroit. vuzov* [Mechanics of destruction for builders: study guide for institutes of civil engineering]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1991. 288 p.
3. Murakami Yu. *Spravochnik po koeffitsientam intensivnosti napryazhenii* [Reference book on coefficients of stress intensity]. Moscow, Mir Publ., 1990. 448 p.
4. Zaytsev Yu. V. *Modelirovanie deformatsii i prochnosti betona metodami mekhaniki razrusheniya* [Modeling of deformations and concrete strength by methods of mechanics of destruction]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1982. 196 p.
5. Cherepanov G. P. *Mekhanika khrupkogo razrusheniya* [Mechanics of fragile destruction]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 640 p.
6. Abaqus 6.13 Documentation. Dassault Systemes.
7. Abaqus/CAE User's Guide. Dassault Systemes.
8. Abaqus Analysis User's Guide. Dassault Systemes.
9. Zhen-zhong Du. *eXtended Finite Element Method (XFEM) in Abaqus*. Dassault Systemes.
10. Venttsel' E. S. *Teoriya veroyatnostei* [Probability Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 576 s.
11. Pugachev V. S. *Teoriya sluchainykh funktsii i ee primeneniye k zadacham avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of stochastic functions and its appliance to the problems of automatic control]. Moscow, 1960. 842 p.

For citation:

Chauskin A. Yu., Pshenichkina V. A. [Mathematical modeling of fracture mechanics problems by xfem method taking into account stochastic nature of inhomogeneous material]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 40(59), pp. 197—207.

About authors:

Chauskin Andrei Yur'evich — Postgraduate student of Engineering Structures, Foundations and Safety of Constructions Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, a.chauskin@gmail.com

Pshenichkina Valeriya Aleksandrovna — Doctor of Engineering Science, Professor, Head of Engineering Structures, Foundations and Safety of Constructions Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, rap_hm@list.ru

УДК 656/13(470.45)

Е. Ю. Серова, Н. В. Сапожкова

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТА НА УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ ВОЛГОГРАДА

Представлены результаты социологического опроса участников дорожного движения по проблемам организации движения транспорта на улично-дорожной сети Волгограда. Проведен анализ показателей, характеризующих работу городской транспортной системы.

Ключевые слова: пассажиропоток, дорожное движение, улично-дорожная сеть, пассажирский транспорт, социологическое исследование.

В настоящее время для многих городов России характерно перенасыщение транспортных сетей автомобильным транспортом, снижение пропускной способности транспортных сетей. На улично-дорожной сети г. Волгограда, особенно в часы пик, также наблюдается высокая загруженность транспортом, что приводит к уменьшению средней скорости движения транспорта и возникновению заторов. Основная причина указанных проблем связана с повышением уровня автомобилизации и увеличением подвижности населения на фоне недостаточных темпов развития улично-дорожной сети. Кроме того, увеличение подвижности городского населения порождает целый ряд проблем, связанных с движением транспорта в городах, поскольку подавляющее число передвижений с трудовыми и культурно-бытовыми целями в Российской Федерации осуществляется в пределах населенных пунктов или в пригородах. Поэтому одной из основных задач совершенствования перевозок пассажиров и повышения уровня организации дорожного движения является развитие городской транспортной системы на основе использования научно-го подхода и проведения периодических исследований.

Транспортные системы городов имеют свои особенности, которые характеризуются общими и частными показателями [1—6]. Многие показатели могут быть получены измерением, наблюдением, расчетно-аналитическими методами. В то же время определение количественных значений отдельных показателей требует использования эвристических методов: экспертного, специально организованных социологических опросов с последующей обработкой методами статистики [7, 8]. К общим показателям относятся объемы перевозок и их структура, способы передвижений (поездки) населения, затраты времени на передвижение, средняя дальность передвижений, средняя скорость передвижений.

Структура пассажирских перевозок по способам передвижения существенно влияет на процесс городского дорожного движения. Наиболее популярным и востребованным видом общественного транспорта в Волгограде является маршрутное такси: 62,6 % опрошенных предпочитают именно этот вид транспорта. Более 26 % респондентов используют трамвай, 14,8 % — троллейбус (рис. 1). Личный вид транспорта (легковой автомобиль) в качестве варианта ответа указали 41,8 % опрошенных.

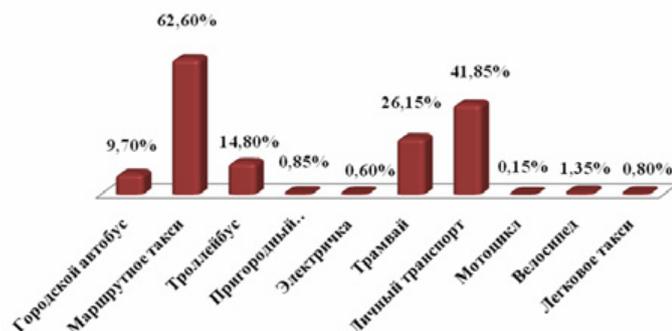


Рис. 1. Виды транспорта, используемые населением Волгограда для транспортных перемещений

Предпочтения населения в выборе вида транспорта зависят от различных факторов, в том числе и социального характера. Как показывают исследования [1, 2], с увеличением доходов предпочтение отдается поездкам на личном автомобиле. При этом происходит снижение транспортной подвижности на городском пассажирском транспорте от 13 до 40 %. Однако общественный транспорт способен обеспечивать более экономичное использование улично-дорожной сети, чем индивидуальные автомобили. Так, при провозной способности легкового автомобиля 1,4 тыс. чел./ч площадь полосы дороги, занимаемой одним пассажиром, составляет 10,7 м² в неподвижном состоянии и 62,5 м² при скорости 50 км/ч. Для троллейбусов (автобусов) в среднем провозная способность — 10 тыс. чел./ч, площадь полосы дороги, занимаемой одним пассажиром, — 1,0 и 8,8 м² в неподвижном состоянии и при движении соответственно. Для скоростного трамвая эти показатели еще более оптимальные: провозная способность 18 тыс. чел./ч, площадь полосы дороги, занимаемой одним пассажиром в неподвижном состоянии и при движении, составляет 0,8 и 3,9 м².

Также неудовлетворенность пассажиров качеством городского пассажирского транспорта служит причиной выбора личного автомобиля [2]. Результаты социологического опроса населения Волгограда показали, что работу общественного транспорта плохой считают 11,12 % респондентов и неудовлетворительной 3,45 % (рис. 2).

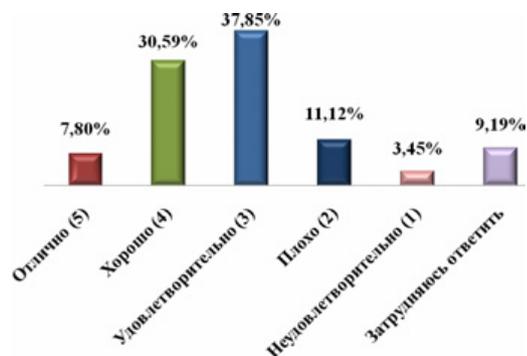


Рис. 2. Результаты оценки качества работы общественного пассажирского транспорта в Волгограде по 5-балльной шкале

Обобщающим показателем состояния городской транспортной сети является коэффициент удовлетворенности населения транспортной системой и ее подсистемами. Состояние транспортного обслуживания в городах может быть определено с помощью дифференциальной оценки качества в виде отношения нормативного уровня показателя к фактическому (коэффициент относительного обеспечения норматива) [4]:

$$K = \frac{t_n \cdot y_n}{t_{\phi} \cdot y_{\phi}} R, \quad (1)$$

где t_n — норматив времени, затрачиваемого пассажиром на поездку, мин (предполагалось установить 40 мин для городов с численностью жителей более 1 млн; 35 мин — от 500 тыс. до 1 млн; 30 мин — от 250 до 500 тыс.; 25 мин — менее 250 тыс.); t_{ϕ} — время, фактически затрачиваемое пассажиром на поездку, мин; y_n — нормативный коэффициент наполнения, рекомендуемый для городских перевозок в среднем не более 0,3, а в часы пик 0,8; y_{ϕ} — фактическое значение коэффициента наполнения; R — показатель регулярности движения.

Входящие в выражение (1) показатели оценивают организацию движения городского пассажирского транспорта на маршрутах, удобство перевозок для пассажиров. Одними из наиболее важных критериев оценки качества транспортного обслуживания населения являются общие затраты времени на передвижение от пункта отправления до пункта назначения y_{ϕ} . Указанный критерий включает показатель скорости сообщения на маршруте, плотность транспортной сети, пересадки, количество подвижного состава линии и др. [9] и может быть использован как для оценки, так и для организации движения транспорта на улично-дорожной сети.

Как показывают результаты социологического опроса, цели поездки у волгоградцев различны и зависят от многих факторов: времени года, дня недели, времени суток, принадлежности респондента к социальной группе и т. д. [10]. Однако в будние дни больший процент составляют деловые поездки. Так, из 2007 опрошенных 1115 респондентов назвали целью своей поездки работу, учебу — 534 человека (рис. 3). Остальные респонденты осуществляют поездки, целями которых в будние дни наиболее часто являются: посещение магазинов и торговых центров, сопровождение детей (школа, детский сад), посещение спортивных учреждений, кафе, клубов, учреждений здравоохранения, которые имеют большую степень случайности.

Поэтому очень важно при организации движения маршрутного пассажирского транспорта обеспечить минимальные затраты времени на передвижения именно к месту работы или учебы с учетом результатов исследований транспортной подвижности населения. На диаграммах (рис. 4) представлено распределение продолжительности регулярных (деловых) перемещений по времени суток, на рис. 5 — распределение продолжительности транспортных перемещений по видам транспорта.

Утром средняя продолжительность поездки составляет 38,13 мин. Вечером — 31,47 мин. Учитывая, что для Волгограда с населением 1018,8 тыс. человек средние затраты времени на передвижение до места работы и учебы должны составлять 35...40 мин, в утренние часы продолжительность времени на передвижение превышает норматив более чем у 24 % респондентов, в вечерние часы — у 22 % опрошенных.

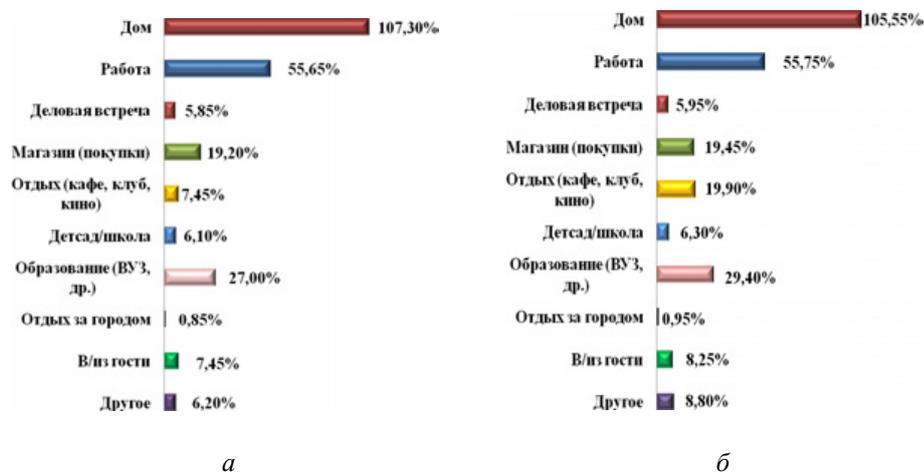


Рис. 3. Распределение целей поездок, %: *а* — пункты отправления; *б* — пункт назначения

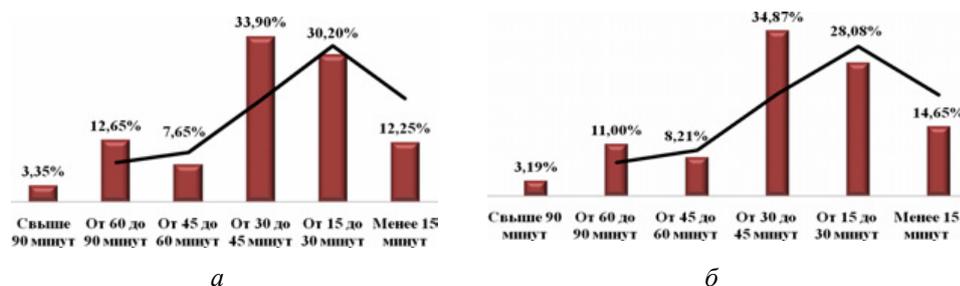


Рис. 4. Распределение продолжительности транспортных перемещений по времени суток, %: *а* — утренние часы; *б* — вечерние часы

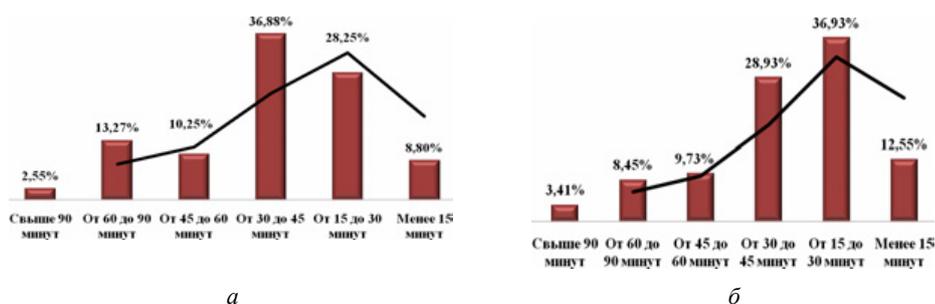


Рис. 5. Распределение продолжительности транспортных перемещений по видам транспорта, %: *а* — общественный транспорт; *б* — личный

Средняя продолжительность поездок на общественном транспорте составляет 38,5 мин, в то же время около 16 % опрошенных на такие поездки тратят более одного часа (рис. 5, *а*). Продолжительность поездок на личном транспорте в среднем составляет 34,1 мин, однако около 12 % владельцев личного транспорта тратят на транспортные перемещения более 60 мин (рис. 5, *б*).

Другим значимым показателем качества обслуживания пассажиров, входящим в выражение (1), является коэффициент использования пассажироместности (коэффициент наполнения) u_{ϕ} , который зависит от типа (вместимости) транспортных средств, регулярности движения, количества пассажирского транспорта на маршрутах.

Основой организации движения пассажирского транспорта является расписание движения, определяющее число рейсов, регулярность движения. Для муниципальных перевозчиков такое расписание разработано, у коммерческих оно отсутствует. Кроме того, выявлено, что интервалы движения транспортных средств, осуществляющих движение по обследованным маршрутам, не соответствуют нормативным требованиям у 53 % маршрутов маршрутных такси, у 100 % маршрутов автобусов и у 44 % маршрутов электротранспорта [11]. Неравномерное распределение пассажирского транспорта привело к тому, что на одних маршрутах и в определенные периоды суток интервалы минимальны и коэффициент наполнения не превышает 0,2, а на других интервалы доходят до 40 мин, а наполняемость салонов пассажирского транспорта достигает физического предела.

Планируя коэффициент использования пассажироместности, нужно учитывать необходимость создания комфортных условий для пассажиров путем соблюдения расписаний движения, выбора типа и количества подвижного состава на линии с учетом колебаний мощности пассажиропотоков (рис. б).

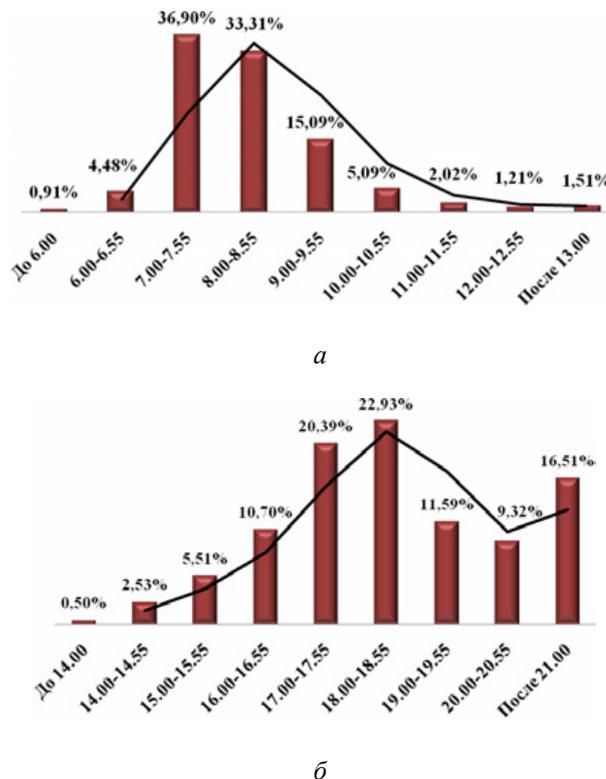


Рис. б. Итоговое распределение времени начала перемещений в будние дни: а — на работу; б — в вечерние часы с места работы

Изменения пассажиропотоков по времени, по участкам и направлению маршрутов требуют решения задач прогнозирования по часам суток и дням недели, а также прогнозирования дорожных условий. Это позволит определять необходимое количество единиц пассажирского транспорта с учетом фактической численности пассажиров и обеспечит более рациональное распределение внутригородского общественного транспорта по маршрутной сети города [12]. Также необходима корректировка расписания, разработка рациональных графиков выпуска и организации работы городского пассажирского транспорта на маршрутах, четкий контроль за соблюдением расписаний движений.

Более гибкое решение задач контроля транспорта и диспетчерского управления движением возможно за счет применения спутниковых навигационных систем и автоматизированных систем мониторинга пассажиропотоков. Причем использование оперативной информации о пассажиропотоках позволит оптимизировать режимы работы подвижного состава на линии [12—16].

Общественное мнение участников дорожного движения может быть использовано для разработки мероприятий по совершенствованию организации движения транспорта на улично-дорожной сети города. Так, при оценке уровня транспортного обслуживания респондентами названы следующие факторы, отрицательно влияющие на качество пассажирских перевозок: в час пик сложно сесть в транспорт, приходится делать пересадки, большие интервалы движения; низкая скорость движения; некомфортный подвижной состав и др. Долевое участие факторов представлено в табл.

Факторы, отрицательно влияющие на качество пассажирских перевозок	Долевое участие оцениваемого фактора, %
В час пик не сесть в транспорт, в салоне давка	52,4
Большие интервалы движения, долго приходится ждать	24,7
Далеко идти до остановки	22,2
Приходится делать много пересадок	5,15
Низкая скорость	26,45
Некомфортный подвижной состав (неудобные сидения, неудобно входить и выходить, в салоне грязно)	32,35
Нет остановочных павильонов или они в плохом состоянии	5,70
Другое	2,40

Примечание: количество опрошенных — 2007 ч.

Ответы на вопрос: «Что Вас не устраивает при поездке на автомобиле?» позволили выявить факторы, оказывающие наибольшее влияние на оценку условий движения транспорта (рис. 7).

С вышеперечисленными факторами связаны и основные пожелания респондентов по улучшению работы транспортной системы города.

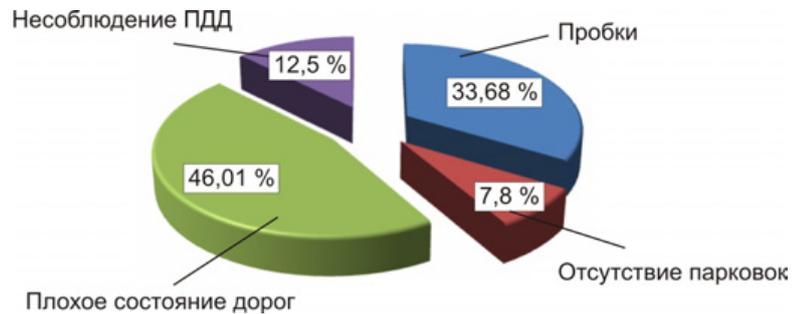


Рис. 7. Факторы, отрицательно влияющие на оценку условий движения транспорта в Волгограде, %

Предложения волгоградцев по улучшению транспортной ситуации в большинстве сводились к двум основным требованиям (расчеты производились от числа ответивших на вопрос так, чтобы общая сумма ответов составляла 100 %, притом что респонденты в открытом вопросе могли указать неограниченное количество ответов).

Большая часть опрошенных считает, что для решения задач совершенствования транспортной инфраструктуры необходим качественный ремонт автомобильных дорог (74,20 %) (рис. 8). На втором месте строительство парковок — 7,43 % респондентов. Кроме того, были высказаны предложения по совершенствованию организации дорожного движения, включающие мероприятия по ремонту и замене технических средств организации дорожного движения, применение современных средств регулирования движения с применением АСУД (автоматизированной системы управления дорожным движением), повышение безопасности пешеходных переходов (строительство надземных и подземных пешеходных переходов в том числе).



Рис. 8. Предложения населения по совершенствованию транспортной инфраструктуры, %

Среди предложений респондентов по улучшению работы и качества обслуживания общественного транспорта следует выделить пожелание использования нового подвижного состава общественного пассажирского транспорта, отвечающего современным требованиям удобства и безопасности пассажиров (39,30 %). На втором месте — увеличение количества и вместимости автобусов, что немаловажно для уменьшения интервалов движения, особенно в часы повышенной транспортной активности населения (рис. 9).



Рис. 9. Предложения населения по улучшению работы городского пассажирского транспорта, %

Высказывались и противоречивые мнения. Например, наряду с предложением запретить маршрутки предлагалось увеличить количество маршрутных такси. Были высказаны пожелания и о снижении стоимости проезда.

Учет общественного мнения населения в области транспортного обслуживания и условий движения способствует наиболее рациональному выбору направлений развития маршрутного пассажирского транспорта, решению задач повышения качества пассажирских перевозок, совершенствованию организации движения на улично-дорожной сети крупных городов, в том числе и при проведении массовых спортивных и общественных мероприятий международного значения [17, 18].

Таким образом, городской пассажирский транспорт играет важную роль в снижении уровня загрузки улично-дорожной сети в условиях непрерывного роста городов, насыщения транспортными средствами, увеличения подвижности населения. Поэтому вполне обоснованы предложения по решению транспортной проблемы на наиболее загруженных участках путем повышения эффективности использования общественного транспорта и использование такой крайней меры, как введение ограничений для индивидуальных автомобилей. Но это возможно при достаточно высоком уровне развития системы городского транспорта, сформированной на основе применения методов управления, учитывающих постоянно меняющиеся условия и общественное мнение участников дорожного движения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гудков В. А., Гудков Д. В., Мыльников П. А. Удовлетворенность населения транспортной системой // Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств. Материалы VII международной науч.-технич. конф., 16—18 мая 2012 г. Пенза. Пенза: ПГУАС, 2012. С. 37—41.
2. Дьячкова О. М., Володькин П. П., Ланских В. В. Эффективность функционирования городского пассажирского транспорта // Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств: материалы VII международной науч.-технич. конф., 16—18 мая 2012 г. Пенза. Пенза: ПГУАС, 2012. С. 70—75.
3. May A. D. Improving Decision-making for Sustainable Urban Transport: An Introduction to the DISTILLATE Research Programme // Journal of Transport and Infrastructure. 2009. Vol. 9. № 3. Pp. 184—201.
4. Тлеженов Б. Н. Анализ методов оценки показателей качества системы городского пассажирского транспорта // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 3. URL: www.science-education.ru/103-6121.
5. Jeon C. M., Amekudzi A. Addressing Sustainability in Transportation Systems: Definitions, Indicators, and Metrics // Journal of Infrastructure Systems. March. 2005. Vol. 3. Iss. 1. Pp. 31—50, ASCE.
6. Marsden G., Shell C. The Role of Indicators, Targets and Monitoring in Decision-Support for Transport // European Journal of Transport and Infrastructure Research. 2009. Issue 9 (3). Pp. 219—236.
7. Деметьев С. М., Серова Е. Ю. Оценка потребительской удовлетворенности качеством работы предприятий дорожного сервиса // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2009. Вып. 16(35). С. 93—95.
8. Качество пассажирских перевозок: возможность исследования методами социологии : учеб. пособие / В. А. Гудков, М. М. Бочкарева, Н. В. Дулина, Н. А. Овчар. Волгоград: ВолГГУ, 2008. 163 с.
9. Отчет о НИР. «Проведение социологических исследований и исследования транспортных потоков с целью формирования системы исходных данных для разработки Стратегии развития транспортной системы округа город-герой Волгоград на перспективу до 2025 года с учетом реализации задач транспортного обеспечения проведения игр Чемпионата мира по футболу 2018 года (приложение к Комплексной транспортной схеме Волгограда до 2025г.)». Волгоград: ВолГАСУ, 2014. 147 с.
10. Славина Ю. А., Гусев С. А. Пути повышения качества перевозок пассажиров в городе Саратове // Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств: материалы VII международной науч.-технич. конф., 16—18 мая 2012 г., Пенза. Пенза: ПГУАС, 2012. С. 120—124.
11. Отчет о НИР «Обследование пассажиропотоков на маршрутной сети общественного транспорта г. Волгограда». Волгоград : ВолГАСУ, 2013. 154 с.
12. Серова Е. Ю., Сапожкова Н. В. Совершенствование организации движения пассажирского транспорта на автомагистралях г. Волгограда // Развитие и модернизация улично-дорожной сети (УДС) крупных городов с учетом особенностей организации и проведения массовых мероприятий международного значения (в рамках подготовки к чемпионату мира по футболу 2018 г.). Материалы Международной науч.-практич. конф., 17—19 сентября 2014 г., Волгоград, 2014. С. 138—143.
13. 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.
14. Popov S. Yu. Technology of Traffic Control of Passenger Public Transport to Provide Road Safety // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2009. Vol. 2. Iss. 3(62). Pp. 65—68.
15. Ostroukh A. V., Polgun M. B. Automation of processes supervisory control urban passenger transport // International Journal of Advanced Studies (iJAS). 2013. Vol. 3. Iss. 3. Pp. 3—9.
16. Parent M. Advanced Urban Transport: Avtomation is on the way // Intelligent systems. March/April 2007. Pp. 9—10.
17. Marsden G., Kelly C., Nellthorp J. The likely impacts of target setting and performance rewards in local transport // Transport Policy. 2009. Vol. 16. № 2. Pp. 55—97.
18. Organization and Management of Transport Provided for the Guests and Participants of the Olympic Games / A. Ismailov, A. Lvova, A. Nikolaev, A. Ostroukh // Middle-East Journal of Scientific Research. 2013. Vol. 17 (8). Pp. 1098—1104.

© Серова Е. Ю., Сапожкова Н. В., 2015

Поступила в редакцию
в марте 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Серова Е. Ю., Сапожкова Н. В. Оценка состояния организации движения транспорта на улично-дорожной сети Волгограда // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 40(59). С. 208—218.

Об авторах:

Серова Елена Юрьевна — канд. техн. наук, доцент кафедры строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Сапожкова Наталья Васильевна — канд. техн. наук, доц. кафедры строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, sapozhkovanv@rambler.ru

E. Yu. Serova, N. V. Sapozhkova

ASSESSMENT OF THE STATE OF THE TRAFFIC ORGANIZATION OF THE STREET AND ROAD NETWORK IN VOLGOGRAD

The results of the sociological poll of participants of traffic on the problems of traffic organization of street and road network in Volgograd are presented. The analysis of the indexes characterizing the operation of city transport system is carried out.

Key words: passenger traffic, traffic, street and road network, passenger transport, sociological research.

REFERENCES

1. Gudkov V. A., Gudkov D. V., Myl'nikov P. A. [Satisfaction of the population with the transport system]. *Problemy kachestva i ekspluatatsii avtotransportnykh sredstv. Materialy VII mezhdunarodnoi nauch.-tekhnich. konf., 16—18 maya 2012 g.* [Problem of quality and operation of vehicles. Proc. VII Int. Conf.]. Penza, 2012. pp. 37 — 41.
2. D'yachkova O. M., Volod'kin P. P., Lanskih V. V. [Operating efficiency of the city passenger transport]. *Problemy kachestva i ekspluatatsii avtotransportnykh sredstv. Materialy VII mezhdunarodnoi nauch.-tekhnich. konf., 16—18 maya 2012 g.* [Problem of quality and operation of vehicles. Proc. VII Int. Conf.]. Penza, 2012, pp. 70—75.
3. May A. D. Improving decision-making for sustainable urban transport: An introduction to the DISTILLATE research programme. *Journal of Transport and Infrastructure*, 2009, 9(3), pp. 184—201.
4. Tlegenov B. N. [Analysis of quality assessment methods of the system of the city passenger transport]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2012, no. 3. URL: www.science-education.ru/103-6121.
5. Jeon C. M., Amekudzi A. Addressing Sustainability in Transportation Systems: Definitions, Indicators, and Metrics. *Journal of Infrastructure Systems*, March, 2005, 3(1), pp. 31—50, ASCE.
6. Marsden G., Shell C. The Role of Indicators, Targets and Monitoring in Decision-Support for Transport. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 2009, 9 (3), pp. 219—236.
7. Dement'ev S. M., Serova E. Yu. [Estimation of consumer sufficiency quality of work of the enterprises of road service]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2009, 16(35), pp. 93—95.
8. Gudkov V. A., Bochkareva M. M., Dulina N. V., Ovchar N. A. *Kachestvo passazhirskikh perevozok: vozmozhnost' issledovaniya metodami sotsiologii : ucheb. posobie* [Quality of passenger traffic: possibility of research by the methods of sociology: study guide]. Volgograd: VSTU Publ., 2008. 163 p.
9. *The report on RDW (research and development work). "Carrying out of sociological researches and investigation of transport flows in order to form the system of basic data for the creation of the Strategy of development of transport system in the district of the hero-city of Volgograd for the perspective till 2025 taking into account the realization of problems of transport service during*

FIFA World Cup 2018 (the annex to the Complex transport scheme of Volgograd till 2025)". Volgograd, VSUACE publ., 2014. 147 p.

10. Slavina Yu. A., Gusev S. A. [Ways of improvement of quality of passenger transportations in Saratov city]. *Problemy kachestva i ekspluatatsii avtotransportnykh sredstv. Materialy VII mezhdunarodnoi nauch.-tekhnich. konf., 16—18 maya 2012 g.* [Problem of quality and operation of vehicles. Proc. VII Int. Conf.]. Penza, 2012. Pp. 120—124.

11. *Otchet o NIR «Obsledovanie passazhiropotokov na marshrutnoi seti obshchestvennogo transporta g. Volgograda»* [Report on RDW "Inspection of Passenger Flow on a Route Network of Public Transport in Volgograd"]. Volgograd, VSUACE Publ., 2013. 154 p.

12. Serova E. Yu., Sapozhkova N. V. [Improvement of the arrangement of passenger transport traffic on highways in Volgograd]. *Razvitie i modernizatsiya ulichno-dorozhnoi seti (UDS) krupnykh gorodov s uchetom osobennostei organizatsii i provedeniya massovykh meropriyatiy mezhdunarodnogo znacheniya (v ramkakh podgotovki k chempionatu mira po futbolu 2018 g.). Materialy Mezhdunarodnoi nauch.-praktich. konf., 17—19 sentyabrya 2014 g.* [Development and modernization of street and road network (SRN) in large cities taking into account the features of arrangement and carrying out of mass events of the international importance (within the preparations for FIFA World Cup 2018). Proc. Int. Conf.]. Volgograd, 2014, pp. 138—143.

13. Yurchenko P. I., Il'in E. P., Zamyatin V. I. [Automatization of statistical research of passenger flows of a route network of public transport in Barnaul]. *Polzunovskii al'manakh* [Polzunovskii almanac], 2010, no. 2, pp. 42—44.

14. Popov S. Yu. Technology of Traffic Control of Passenger Public Transport to Provide Road Safety. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2009, 2, 3(62), pp. 65—68.

15. Ostroukh A. V., Polgun M. B. Automation of processes supervisory control urban passenger transport. *International Journal of Advanced Studies (iJAS)*, 2013, 3(3), pp. 3—9.

16. Parent M. Advanced Urban Transport: Avtomation is on the way. *Intelligent systems*, March/April 2007, pp. 9—10.

17. Marsden G., Kelly C., Nellthorp J. The likely impacts of target setting and performance rewards in local transport. *Transport Policy*, 2009, 16(2), pp. 55—97.

18. Ismailov A., Lvova A., Nikolaev A., Ostroukh A. Organization and Management of Transport Provided for the Guests and Participants of the Olympic Games. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 2013, 17 (8), pp. 1098—1104.

For citation:

Serova E. Yu., Sapozhkova N. V. [Assessment of the state of the traffic organization of the street and road network in Volgograd]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 40(59), pp. 208—218.

About authors:

Serova Elena Yur'evna — 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

Sapozhkova Natal'ya Vasil'evna — 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, sapozhkovav@rambler.ru

УДК 62-82:69.002.5

Н. А. Фоменко^а, В. И. Богданов^б, О. В. Бурлаченко^а, С. В. Алексиков^а

^а *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

^б *Волжский институт строительства и технологий (ВИСТех) — филиал ВолгГАСУ*

СИСТЕМА ЗАЩИТЫ ГИДРОПРИВОДА СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНЫХ МАШИН

Разработана конструкция электрогидравлической системы защиты строительно-дорожных машин от несанкционированного выброса рабочей жидкости при разрушении рукавов высокого давления.

К л ю ч е в ы е с л о в а: гидропривод, гидравлическая система, рукав высокого давления, защита гидропривода, запорное устройство.

В настоящее время в эксплуатации находится большое количество гидрофицированных машин различного назначения. Гидрофицированные машины и агрегаты имеют ряд преимуществ, среди которых: удобство управления рабочими органами; высокая скорость и плавность изменения положения рабочей машины; реверс рабочего органа; отдельное управление рабочими машинами; точность позиционирования и дозирования силового воздействия на рабочие органы; компактность; высокие кинематические характеристики агрегата. Анализ отечественных и зарубежных источников показывает, что на практике определилась область применения гидравлических систем в подъемно-транспортных механизмах, системах регулирования глубины рабочего органа при планировке поверхности, 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 гидравлической системы используется в тягово-транспортных средствах, в строительно-дорожных, грузоподъемных машинах, манипуляторах и др. Гидропривод обеспечивает не только подъем и опускание орудий, грузов, но и автоматическое регулирование заданного режима работы машины.

В конструкциях наземных машинно-технологических комплексов 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. К ним относятся насосы постоянного рабочего объема, например шестеренные насосы, к СПД — насосы с постоянным или переменным объемом. Недостатком первой являются потери мощности потребителей различной гидравлической загрузки, второй — повышение требований к герметичности распределительной аппаратуры. Поэтому наиболее рациональной считается комбинированная СЧН, обеспечивающая автоматическое изменение давления и расхода. Давление в таких системах преимущественно составляет 16...20 МПа.

Условия работы гидросистем определяются природно-климатическими, ландшафтно-технологическими особенностями и взаимодействием рабочих органов с обрабатываемым материалом.

Природно-климатические факторы характеризуются диапазоном изменения температуры и ее суточными колебаниями, влажностью, ветровыми нагрузками, солнечным излучением, химической и бактериологической активностью среды.

Исследования показывают [1], что гидросистема строительно-дорожных машин работает в условиях значительных колебаний наружной температуры (от -50°C до $+60^{\circ}\text{C}$) и влажности окружающего воздуха (от 5 до 100 %). При этом существенно меняется и внутренняя температура — температура рабочей жидкости (от 30 до 60°C). Все это приводит к ухудшению свойств материала, из которого изготовлены агрегаты гидросистемы, и снижает надежность всей конструкции.

К ландшафтно-технологическим особенностям относятся: вид и свойства поверхности, по которой движется агрегат; рельеф местности; вид выполняемого технологического процесса, его изменчивость; характер колебаний нагрузки и т. д.

Перечисленные выше факторы определяют динамические нагрузки на агрегаты гидросистемы, вызывают пульсации давления в гидросистеме и, в конечном итоге, приводят к усталостному разрушению деталей гидросистемы и, прежде всего, рукавов гидролиний.

Существенное влияние на режимы работы гидросистемы оказывает взаимодействие рабочих органов с обрабатываемым материалом и, в первую очередь, постоянно изменяющееся сопротивление рабочих органов и вызываемое этим изменение давления в гидросистеме.

Характер изменения давления в трубопроводах гидролиний, создающий динамические нагрузки в гидросистеме, показан на рис. 1.

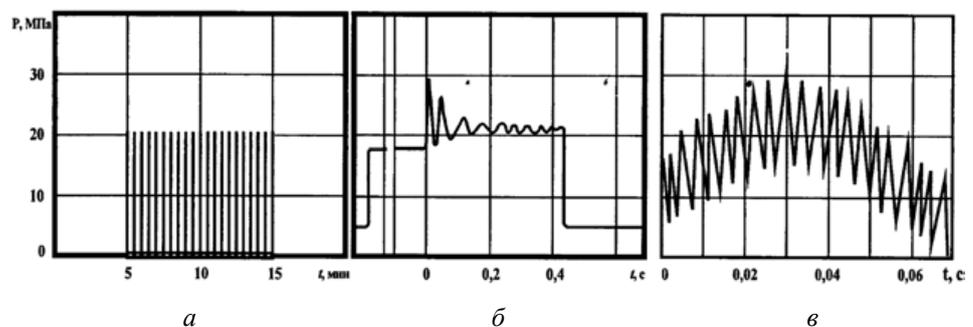


Рис. 1. Характер колебаний давления в гидросистеме: *a* — пульсирующий цикл, характерный для трубопроводов, периодически нагружаемых рабочим давлением; *б* — колебания давления в момент включения потребителя; *в* — пульсации давления в рабочем режим

Как видно из приведенных диаграмм, максимальные пики давления отмечаются в момент включения рабочих гидроцилиндров и могут в полтора раза превышать величину номинального рабочего давления (рис. 1, *б*). Затем колебания давления переходят в затухающие, но обладают высокой частотой, что может привести к вибрации трубопроводов и их возможному разрушению.

Характер колебаний, показанный на рис. 1, *в*, имеет сложную форму. Основную роль здесь играют пульсации давления, создаваемые гидронасосом. Они могут вызывать интенсивные вынужденные колебания трубопроводов, а в случае совпадения частот — резонансные вибрации. Такие вибрации чаще всего являются основной причиной усталостного разрушения рукавов высокого давления. В последнее время отмечается тенденция к повышению мощности гидропривода и рабочего давления в гидросистемах машин. Увеличение мощности гидроприводов машин гидросистем сопровождается ростом потребляемой рабочей жидкости. Увеличение объема рабочей жидкости в гидросистеме практически прямопропорционально потребляемой мощности гидропривода (рис. 2).

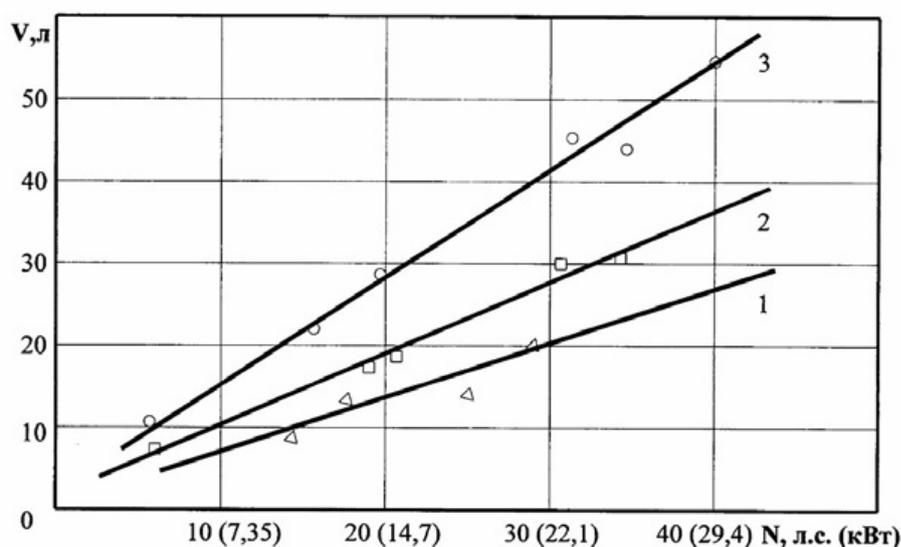


Рис. 2. Изменение объема рабочей жидкости в гидросистеме в зависимости от потребляемой мощности гидропривода: 1 — гидрофицированные рабочие органы без учета агрегируемых прицепов; 2 — объем рабочей жидкости для питания заднего навесного устройства без учета агрегируемых машин; 3 — объем рабочей жидкости для питания навесного устройства машин и гидрофицированных рабочих органов без учета агрегируемых машин

Рабочий процесс землеройно-транспортных машин, например бульдозеров, состоит из трех основных операций: рабочий ход (копание или перемещение призмы грунта); остановка перед откатом назад с подъемом отвала; откат на заднем ходу и остановка перед началом нового цикла. При этом гидросистема испытывает резко выраженный динамический циклично повторяющийся режим нагрузки. При работе землеройно-транспортных машин в течение часа около 100 раз производится переключение передач с целью изменения рабочих скоростей движения, при этом 50...150 раз включаются рычаги поворота и 500...800 раз — гидрораспределитель. При таком режиме работы бульдозера в течение года при наработке 1500 моточасов при средней длине гона 50 м число включений гидросистемы составляет примерно 150..200 тыс. Диапазон циклов нагружения составляет 5...6 с, причем длительность цикла больше у тягачей, обладающих большей энергонасыщенностью.

Около 70 % времени бульдозер работает с максимальным тяговым усилием, достигающим 0,9 веса машины. При этом примерно 15...20 % рабочего времени затрачивается на передвижение задним ходом. Транспортные пробеги носят эпизодический характер. Под нагрузкой с постоянно изменяющимся усилием бульдозер работает более 80 %, что создает неблагоприятный режим работы гидросистемы и повышает вероятность разрушения гидроагрегатов и, как следствие, вероятность выброса рабочей жидкости.

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 — нефтепродуктов) наносит значительный ущерб экологической безопасности (фауне, флоре) [2], приводит к невосполнимым потерям биоресурсов и др.

По этой причине рост рабочего давления в гидросистемах тягово-транспортных средств, сельскохозяйственных, 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 машин.

Совершенствование конструкции систем защиты гидроприводов [2—8] гидравлических систем наземных машинно-технологических комплексов является весьма актуальной задачей.

Органические (растительного происхождения) рабочие жидкости, безвредные при несанкционированном выбросе их в атмосферу, из-за длительного цикла производства и высокой себестоимости не могут обеспечить потребности многочисленного парка машин. В этой связи целесообразно продолжать исследования по совершенствованию способов и устройств защиты гидравлической системы [9].

В настоящее время борьба с потерями рабочей жидкости при несанкционированном выбросе в атмосферу ведется по двум направлениям: повышение прочности рукавов [10, 11] и создание способов и систем защиты.

Создано множество типов систем защиты гидравлической системы, которые отличаются по принципу действия, по месту расположения, по функциональным параметрам, по типу сигнального устройства, по 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, пневмоэлектрическая система защиты — 6...8 л, поплавок система защиты — до 10 л.

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 гидравлических систем современных машин во многом определяется совершенством конструкции гибких рукавов высокого давления [12—16]. Для повышения их прочности применяют оплеточное или навивочное металлическое армирование гибких трубопроводов, разработаны новые типы соединений концевой арматуры, например шариковые муфты, изготавливают силовой каркас из высокопрочного полиэфирного волокна и многослойной арматуры, камеру рукава методом экструзии из высококачественной синтетической резины с твердым внутренним покрытием, применяют полиуретан, полиамид или оплетку из нержавеющей стали. 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 гидравлической системе за границей третьего исполнения (18...20 МПа).

При несанкционированном разрушении рукавов высокого давления для гидропневматической системы защиты [17] потери рабочей жидкости составляют 0,5...1,2 л, а для гидромеханической [3, 4] — 0,17 л. Данные исследования показывают, что наиболее эффективным является гидромеханический способ защиты.

Близкой по технической сущности и достигаемому техническому результату является система защиты гидропривода [4], включающая гидробак, редукционный клапан, насос, соединенный напорной линией с гидродвигателем через распределитель, линию слива в гидробак и запорное устройство, установленное в напорной линии и подключенное своей входной полостью к выходу насоса. Запорное устройство выполнено в виде корпуса с размещенным в нем подпружиненным золотником с выполненным со стороны входной полости осевым каналом, сообщенным отверстием через пружинную полость с установленным в ней упорным стержнем с входной полостью, подключенной к входу распределителя, при этом в корпусе золотника выполнены радиальные каналы, сообщающие осевой канал с линией слива.

Недостатком данной системы защиты гидропривода является отсутствие информации о ее срабатывании, а, соответственно, и защиты гидросистемы от несанкционированного выброса рабочей жидкости при неисправном запорном устройстве.

Известна система защиты [6] гидропривода, включающая гидробак, редукционный клапан, насос, соединенный напорной гидролинией с гидроприводом через распределитель, линию слива в гидробак и запорное устройство, включающее корпус с входной, выходной, глухой и сливной полостями, входным, выходным и сливным штуцерами с каналами, установленное в напорной линии и подключенное своей входной полостью к выходу насоса, а выходной — к распределителю, с размещенным во входной полости подпружиненным плунжером с кольцевой проточкой и радиальными отверстиями, с выполненным со стороны входной полости осевым каналом, сообщенным с выходной полостью, в которой установлен подпружиненный подвижный клапан со штоком, при этом шток клапана напорной линией свободно перемещается в упоре.

Недостатком данной системы защиты гидропривода является отсутствие информации о срабатывании запорного устройства в случае его неисправно-

сти и, как следствие, то, что оператор не в состоянии оценить, произошел или нет выброс рабочей жидкости в атмосферу при разрушении рукавов высокого давления.

Общий недостаток анализируемых гидравлических систем заключается в том, что при срабатывании защитного устройства отсутствует контроль момента его срабатывания. При неисправном запорном устройстве и отсутствии обратной связи рабочего процесса защиты от несанкционированного выброса рабочей жидкости в атмосферу не обеспечивается эксплуатационная надежность работы устройства и возникает угроза экологической безопасности окружающей среды.

Эти недостатки снижают эффективность срабатывания запорного устройства, увеличивают время его срабатывания, снижают эксплуатационную надежность устройства и, как следствие, экологическую безопасность использования гидропривода машин и в целом эффективность системы защиты гидропривода.

Предлагается конструктивное решение, оформленное заявкой на изобретение [18], которое устраняет перечисленные недостатки (рис. 3, 4).

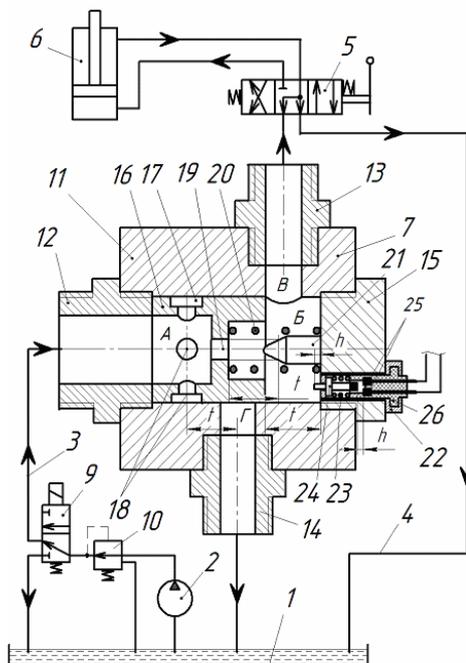


Рис. 3. Система защиты гидропривода

В конструкцию внесены существенные изменения, обеспечивающие быстрое действие защитного устройства, эксплуатационную надежность и экологическую безопасность гидропривода машин. Система защиты гидропривода включает в себя гидробак 1, насос 2, напорную гидролинию 3, линию слива в гидробак 4, распределитель 5, гидродвигатель 6, запорное устройство 7, систему контроля 8 срабатывания запорного устройства, механизм 9 отключения подачи рабочей жидкости в поврежденную гидролинию, редукционный клапан 10.

Запорное устройство 7 включает в себя корпус 11, снабженный входным 12, выходным 13, сливным 14 штуцерами с каналами и пробкой 15. Внутри корпуса 11 запорного устройства размещен подпружиненный плунжер 16 с входной полостью *A*, по наружной поверхности которого выполнены кольцевая проточка 17 и радиальные отверстия 18 на расстоянии от вертикальной оси сливного штуцера 14, равному полному ходу *t* плунжера 16, и осевой канал 19. Плунжер 16 в исходном положении удерживается пружиной 20, которая поджимается пробкой 15. Упор 21 представляет собой стержень с коническим наконечником, который служит для перекрытия осевого канала 19 плунжера 16. Взаимное расположение торца плунжера 16 и пробки 15 находится на расстоянии, равному полному ходу *t* плунжера 16. Входная полость *A* сообщается с пружинной *B*, выходной *B* и сливной *Г* полостями корпуса 11 запорного устройства 7 посредством осевого канала 19. В пробке 15 размещен металлический корпус 22, внутри которого расположен подпружиненный упругим элементом 23 стержень 24, установленный на расстоянии *h* от торца пробки 15, а также на расстоянии *h* от торца стержня 24 до контактной пары 25, изолированной от корпуса 22 диэлектрическим материалом 26 и подключенной к электрической цепи 8 системы контроля срабатывания запорного устройства, содержащей выключатель электрической цепи 27, источник питания 28, реле 29 и его контакт 30 включения световой 31, звуковой 32 сигнализаций и контакт 33 включения соленоида 34 механизма 9 отключения подачи рабочей жидкости в входной штуцер 12 запорного устройства 7.

Защита гидропривода работает следующим образом. Рабочая жидкость насосом 2 через редукционный клапан 10, поддерживающий рабочее давление в гидросистеме, механизм 9 отключения подачи рабочей жидкости в поврежденную гидролинию при выключенном соленоиде 34 и запорное устройство 7 подается к распределителю 5.

В рабочем состоянии системы защиты гидропривода давление рабочей жидкости в полостях *A*, *B* и *B* при неработающем гидроприводе одинаковое и равно давлению, близкому к атмосферному. При этом плунжер 16 входной полости находится в крайнем левом положении и подпирается пружиной 20, при этом расстояние между торцом осевого канала 19 плунжера 16 и контактной поверхностью упора 21 равно полному ходу плунжера *t*.

При включении распределителем 5 гидродвигателя 6 рабочая жидкость через осевой канал 19 плунжера 16 из входной полости *A* поступает в пружинную полость *B* и через полость *B* и канал выходного штуцера 13 питает под рабочим давлением гидропривод. При этом давление в полостях *A*, *B*, *B* и канале выходного штуцера 13 возрастает до рабочего.

При разрыве гидролинии питания гидропривода давление рабочей жидкости в полости *B* мгновенно падает из-за перепада давления в полостях *A* и *B*, при этом плунжер 16, преодолевая сопротивление пружины 20, перекрывает полость *B* и конусной поверхностью упора 21 осевой канал 19, и поток жидкости направляется через полость *Г* в канал сливного штуцера 14 и затем в гидробак 1. Одновременно плунжер 16 перемещает подпружиненный упругим элементом 23 стержень 24 на величину *h*, равную зазору между контактной парой 25 и торцом стержня 24, замыкает контакт 25, включает реле 29 электрической цепи 8 системы контроля срабатывания запорного устройства. В результате контакты 30 и 31 реле 29 замыкаются, и срабатывает световая

31 и звуковая 32 сигнализации, оповещающая оператора о срабатывании системы защиты устройства несанкционированного выброса рабочей жидкости в атмосферу, и автоматически, с помощью соленоида 34 механизма 9, отключается подача рабочей жидкости в поврежденную гидролинию, и она направляется ее в гидробак 1. Одновременно плунжер 16 и стержень 24 под действием пружин 20 и 23 соответственно возвращаются в исходное положение и замыкают контактную пару 25. При этом реле 29 самоблокируется и сохраняет включенным положение механизма 9 на слив рабочей жидкости в гидробак 1. При неисправном механизме 9 рабочая жидкость от насоса 2 через редукционный клапан 10 продолжает поступать в входную полость А запорного устройства, плунжер которого перекрывает выходную полость В, а упор 21 — его осевое отверстие 19, одновременно стержень 24 замыкает контакты 25 электрической цепи системы контроля 8 срабатывания запорного устройства, включая световую 31 и звуковую 32 сигнализации, и через радиальные отверстия 18 плунжера и сливной штуцер 14 жидкость направляется на слив в гидробак. При этом контакты электрической цепи замкнуты и сигнализация продолжает работать до отключения ее оператором. После устранения неисправности электрическая цепь 8 системы контроля срабатывания запорного устройства отключается выключателем 27 и механизм 9 возвращается в исходное положение подачи рабочей жидкости в гидролинию 3 питания гидропривода.

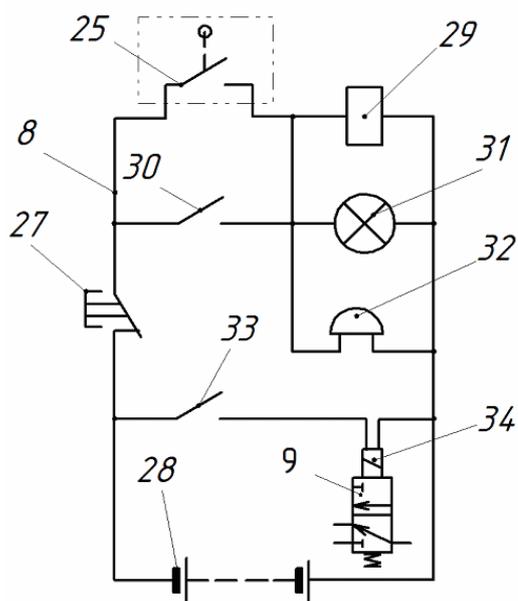


Рис. 4. Электрическая схема защиты гидропривода

Таким образом, предлагаемое изобретение в сравнении с прототипом повышает эксплуатационную надежность системы защиты гидропривода от несанкционированного выброса рабочей жидкости из гидросистемы и, соответственно, экологическую безопасность использования гидропривода рабочих органов машин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фоменко Н. А.* Совершенствование эксплуатационных свойств гидравлических систем машинно-тракторных агрегатов: дис... канд. техн. наук. Волгоград, 2002. 166 с.
2. Гидравлическая система: пат. RU 15764U17F15B21/00/ В. Н. Фоменко, В. И. Перельмитер, Н. А. Фоменко, В. П. Шевчук.
3. *Перельмитер В. И.* Гидравлическая система: пат. SU 1822471 A3 F 15 B 20/ 00.
4. Система защиты гидропривода: пат. SU 1813937 A1 F 15 B 20/00 / Н. А. Фоменко, С. В. Дубинский, Г. И. Голобута, Г. П. Лышко.
5. *Фоменко Н. А., Дубинский С. В., Лышко Г. П.* Повышение эксплуатационной надежности гидросистемы тракторов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1992. № 2.
6. *Фоменко Н. А., Перельмитер В. И., Фоменко В. Н.* Система защиты гидропривода: пат. RU 15763U17F15B21/00.
7. *Фоменко Н. А., Богданов В. И., Бурлаченко О.В.* Система защиты гидропривода. Заявка на изобретение № 2014104928/6 от 13. 02. 2014 г.
8. *Бобков Ю. К., Шевчук В. П., Чернышев В. Г.* Способ защиты гидросистемы : пат. SU 1550255 A1 F 15 B 20/ 00/
9. *Фоменко Н. А., Богданов В. И., Сапожкова Н. В.* Пути совершенствования гидропривода тягово-транспортных средств // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2014. Вып. 36(55). С. 218—222.
10. *Бурлаченко О. В., Сердобинцев Ю. П., Схиртладзе А. А.* Повышение качества функционирования технологического оборудования. Старый Оскол : ТНТ, 2010. 411 с.
11. *Бурлаченко О. В., Заболотный Р. В.* Устройство для измерения контактных деформаций : пат RU 2170919 G 01 3/ 08.
12. Гибкий трубопровод : пат. SU 1550255 A1 F 16 L 11/ 00, E 21 C 45/00 / Р. Ф. Горин, А. Е. Чижов, Ю. Г. Алымов, В. А. Битюков, Э. В. Дорохов, С. Г. Новиков.
13. *Фоменко Н. А., Богданов В. И., Фоменко В. Н.* Трубопровод высокого давления: пат. RU 1661483 A1 F 15 B 20/ 00, F 16 L11/ 20.
14. *Фоменко Н. А., Тырнов Ю. А.* Исследование работоспособности рукавов гидросистемы машинно-тракторных агрегатов // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции — новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства : сб. науч. докл. XVII Междунар. науч.-практ. конф., 24—25 сент. 2013 г., г. Тамбов. Тамбов : Изд-во Першина Р. В., 2013. С. 146—149.
15. Трубопровод гидросистемы строительно-дорожных машин / Н. А. Фоменко, С. В. Алексиков, В. И. Богданов, Н. В. Сапожкова // Вестник развития науки и образования. 2014. № 3.
16. Совершенствование гидравлической системы строительно-дорожных техники / Н. А. Фоменко, О. В. Бурлаченко, С. В. Алексиков, В. И. Богданов, Н. В. Сапожкова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2014. Вып. 38(57). С. 120—124.
17. *Фоменко Н. А., Фоменко В. Н.* Обеспечение экологической безопасности окружающей среды при строительстве объектов // Материалы международной науч.-технич. конф. ИНТЕРСТРОЙМЕХ-2003, 15—17 сентября 2003 г. Волгоград — Волжский, 2003. С. 235—237.
18. *Фоменко Н. А., Богданов В. И., Бурлаченко О. В., Алексиков С. В.* Система защиты гидропривода. Заявка на изобретение № 2014133230 от 12. 08. 2014 г.

© *Фоменко Н. А., Богданов В. И., Бурлаченко О. В., Алексиков С. В., 2015*

*Поступила в редакцию
в апреле 2015 г.*

Ссылка для цитирования:

Система защиты гидропривода строительно-дорожных машин / Н. А. Фоменко, В. И. Богданов, О. В. Бурлаченко, С. В. Алексиков // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 40(59). С. 219—229.

Об авторах:

Фоменко Николай Александрович — канд. техн. наук, доц., Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Богданов Виктор Иванович — канд. техн. наук, доц., проф. кафедры технологических процессов и машин, Волжский институт строительства и технологий (ВИСТех) — филиал ВолгГАСУ. Российская Федерация, 404111, г. Волжский, пр. Ленина, 72

Бурлаченко Олег Васильевич — д-р техн. наук, доц., проректор по учебно-воспитательной работе, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Алексиков Сергей Васильевич — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, AL34rus@mail.ru

N. A. Fomenko, V. I. Bogdanov, O. V. Burlachenko, S. V. Aleksikov

PROTECTION SYSTEM OF HYDRAULIC DRIVE OF ROAD-BUILDING MACHINES

The design of electro-hydraulic protection system of road-building machines from unauthorized discharge of working fluid at the destruction of high pressure hoses is developed.

Key words: hydraulic drive, hydraulic system, high pressure hose, protection of the hydraulic drive, locking device.

REFERENSES

1. Fomenko N. A. *Sovershenstvovanie ekspluatatsionnykh svoystv gidravlicheskikh sistem mashinno-traktornykh agregatov* [Improvement of operating properties of hydraulic systems of machine and tractor units. Diss. Cand. Eng. Sci.]. Volgograd, 2002. 166 p.
2. Fomenko V. N., Perel'miter V. I., Fomenko N. A., Shevchuk V. P. *Gidravlicheskaya sistema* [Hydraulic System]. Patent RF, no. RU 15764U17F15B21/00.
3. Perel'miter V. I. *Gidravlicheskaya sistema* [Hydraulic system. Pat. RF, no. SU 1822471 A3 F 15 B 20/00].
4. Fomenko N. A., Dubinskii S. V., Golobuta G. I., Lyshko G. P. *Sistema zashchity gidroprivoda* [System of Hydraulic Control Protection]. Patent RF, no. SU 1813937A1F15B20/00.
5. Fomenko N. A., Dubinskii S. V., Lyshko G. P. [Increase of operating reliability of hydraulic system of tractors]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva* [Mechanization and electrification of agriculture], 1992, no. 2.
6. Fomenko V. N., Perel'miter V. I., Fomenko N. A. *Sistema zashchity gidroprivoda* [System of Hydraulic Control Protection]. Patent RF, no. RU15763U17F15B21/00.
7. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V. *Sistema zashchity gidroprivoda* [System of Hydraulic Control Protection]. Application for an Invention no. 2014104928/6 dated from 13.02.2014.
8. Bobkov Yu. K., Shevchuk V. P., Chernyshev V. G. *Sposob zashchity gidrosistemy* [Methods of protection of a hydraulic system. Pat. RF, no. SU 1550255 A1 F 15 B 20/ 00/].
9. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Sapozhkova N. V. [Ways of improvement of a hydraulic actuator of traction vehicles]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2014, iss. 36(55), pp. 218—222.
10. Burlachenko O. V., Serdobintsev Yu. P., Skhirtladze A. A. *Povyshenie kachestva funktsionirovaniya tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Improvement of the quality of functioning of processing equipment]. *Staryi Oskol, TNT Publ.*, 2010. 411 p.
11. Burlachenko O. V., Zabolotnyi R. V. *Ustroistvo dlya izmereniya kontaknykh deformatsii* [Device for measurement of contact deformations. Pat RF, no. RU 2170919 G 01 3/ 08].

12. Gorin R. F., Chizhov A. E., Alymov Yu. G., Bityukov V. A., Dorokhov E. V., Novikov S. G. *Gibkii truboprovod* [Flexible pipeline. Pat. RF, no. SU 1550255 A1 F 16 L 11/ 00, E 21 C 45/00].

13. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Fomenko V. N. *Truboprovod vysokogo davleniya* [High pressure pipe. Pat. RF, no. RU 1661483 A1 F 15 B 20/ 00, F 16 L11/ 20].

14. Fomenko N. A., Tyrnov Yu. A. [Research of working capacity of hoses of hydraulic system of machine and tractor units]. *Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya resursov pri proizvodstve sel'skokhozyaistvennoi produktsii — novye tekhnologii i tekhnika novogo pokoleniya dlya rasstnievodstva i zhitovnovodstva : sb. nauch. dokl. XVII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 24—25 sent. 2013 g., g. Tambov* [Increase of efficiency of use of resources when producing agricultural production — new technologies and equipment of new generation for plant growing and cattle breeding. Proc. of XVII Int. Scient.-Pract. Conf., 24—25 Sept. 2013, Tambov]. Tambov, R. V. Pershin's Publishing House, 2013. Pp. 146—149.

15. Fomenko N. A., Aleksikov S. V., Bogdanov V. I., Sapozhkova N. V. [Pipeline of the hydraulic system of construction-road machines]. *Vestnik razvitiya nauki i obrazovaniya* [Bulletin of Development of Science and Education], 2014, no. 3.

16. Fomenko N. A., Burlachenko O. V., Aleksikov S. V., Bogdanov V. I., Sapozhkova N. V. [Improvement of hydraulic system of construction equipment]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2014, iss. 38(57), pp. 120—124.

17. Fomenko N. A., Fomenko V. N. [Ensuring ecological safety of the environment at construction]. *Materialy mezhdunarodnoi nauch.-tekhnich. konf. INTERSTROIMEKh-2003, 15—17 sentyabrya 2003 g. Volgograd — Volzhskii* [Proc. Int. Scient.-Tech. Conf. INTERSTROYMEKH-2003, 15—17 September, 2003]. Volgograd — Volzhskii, 2003. Pp. 235—237.

18. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V., Aleksikov S. V. *Sistema zashchity gidroprivoda* [Protection system for hydraulic drive]. Application for the invention no. 2014133230 dated from 12. 08. 2014.

For citation:

Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V., Aleksikov S. V. [Protection system of hydraulic drive of road-building machines]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 40(59), pp. 219—229.

About authors:

Fomenko Nikolai Aleksandrovich — Candidate of Engineering Science, Docent, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

Bogdanov Viktor Ivanovich — Candidate of Engineering Science, Docent, Professor of Technological Processes and Machines Department, Volzhskii Institute of Civil Engineering and Technology (VIS-Tech) — Affiliate Institute of VSUACE. 72, Lenin Avenue, Volzhskii, 404111, Russian Federation

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

Aleksikov Sergei Vasil'evich — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Construction and Operation of Transport Works Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, AL34rus@mail.ru

ОТ РЕДКОЛЛЕГИИ

«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 изданий.

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/attachments/ld-blank.pdf>), *анкеты* согласия автора на доступ к его персональным данным неограниченного круга лиц (скачать бланк по адресу <http://www.vgasu.ru/attachments/pdsog.pdf>), *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 оригинале.

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 *основного текста* — Times New Roman (Сур) № 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 абзацным 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 TIF или BMP; *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 статьи. Кроме того, *иллюстрации* 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 статьи 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 (Сур) № 10 (10 пунктов).

Пристатейные *библиографические 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 (Сур) № 9 (9 пунктов). Язык библиографических записей соответствует языку описываемых источников.

Библиографический список приводится *дважды*. Во втором варианте все русскоязычные библиографические записи приводятся *в переводе на английский язык*, 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 третьими 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 тексте статьи материалов третьих 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. Корректур 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).

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 www.vgasu.ru, 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: mariapes@mail.ru.

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 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 НИЦ «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 **E 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.



27 февраля 2015 г. на 84-м году жизни скончался доктор технических наук, академик АИИН Украины, академик РЭА, профессор кафедры строительных материалов и специальных технологий Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета **Козлов Юрий Дмитриевич** — известный ученый в области радиационной техники, технологии полимерных материалов, автор более 500 печатных работ. Он является автором 18 монографий, учебников и учебных пособий, более 30 изобретений.

Под научным руководством профессора Ю. Д. Козлова защищены 17 кандидатских и 4 докторские диссертационные работы, он неоднократно возглавлял ученые советы по защите диссертаций.

Школой профессора Ю. Д. Козлова впервые сформулирован ряд новых положений в области радиационной технологии полимерных материалов и защитных средств, конструирования радиационной техники.

Редакция журнала, коллектив ВолгГАСУ приносит искренние соболезнования семье и близким Юрия Дмитриевича.

Научное издание

**ВЕСТНИК
ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

Научно-теоретический и производственно-практический журнал

**Серия: Строительство и архитектура
2015. Вып. 40(59)**

Редактор *М. Л. Песчаная*
Перевод на английский язык *О.Ю. Юшко*
Компьютерная правка и верстка *А. Г. Сиволобова, Ю. С. Лозовицкая*
Компьютерный дизайн обложки *О. Ю. Мелешин*

Подписано в печать 17.06.2015. Формат 70 × 108/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Уч.-изд. л. 9,5. Усл. печ. л. 20,3. Тираж 500 экз. Заказ № 18

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет»
Редакционно-издательский отдел
Отдел оперативной полиграфии
400074, Волгоград, ул. Академическая, 1