

Министерство образования и науки Российской Федерации

**ВЕСТНИК  
ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО  
УНИВЕРСИТЕТА**

**Выпуск**      **Серия: Строительство и архитектура**      **2014**  
**35(54)**      Научно-теоретический и производственно-практический журнал

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

Выходит 4 раза в год  
Основан в 1999 г.

Волгоград

ВолгГАСУ

**С о д е р ж а н и е**

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

|                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Богомолов А. Н., Ушаков А. Н., Богомолова О. А.</b> О напряженном состоянии упругой полуплоскости в случае равномерно распределенной нагрузки, приложенной к штампу, при условии конечной величины сил трения по контакту «штамп — основание» | 5  |
| <b>Богомолов А. Н., Богомолова О. А., Ушаков А. Н., Подлинеев М. О.</b> Отыскание рационального контура подземной выработки на основе условия прочности Кулона                                                                                   | 20 |
| <b>Богомолов А. Н., Ушаков А. Н., Богомолова О. А.</b> Напряженное состояние упругой полуплоскости в случае наклонной нагрузки, приложенной к штампу, при условии его полного прилипания к прямолинейному наклонному основанию                   | 27 |
| <b>Денисов И. В., Харланов В. Л.</b> Современные системы сейсмоизоляции зданий                                                                                                                                                                   | 44 |
| <b>Егоров В. В., Григорьев П. Н.</b> О динамических характеристиках шпренгельных систем                                                                                                                                                          | 52 |
| <b>Корниенко С. В.</b> Температурно-влажностный режим и теплозащитные свойства ограждающих конструкций с краевыми зонами                                                                                                                         | 62 |
| <b>Масляев А. В.</b> Защита жизнедеятельности населения России в зданиях при землетрясении                                                                                                                                                       | 70 |
| <b>Медведев Д. П., Захаров А. В.</b> Построение уравнения регрессии зависимости теплопроводности от плотности и влажности                                                                                                                        | 79 |
| <b>Пшеничкина В. А., Сухина К. Н.</b> Методика оценки остаточного ресурса подстропильных ферм основного корпуса Р-1 ОАО «Волтайр-пром»                                                                                                           | 85 |

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

|                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Жарков А. Ф., Чеснокова О. Г.</b> Расчет влияния температурно-влажностного воздействия на панели АСС «Элевит»                           | 90 |
| <b>Калашникова А. С., Акчуриин Т. К., Пушкарская О. Ю.</b> Многокомпонентная полимерная система для гидроизоляции строительных конструкций | 99 |

|                                                                                                                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Леснов В. В., Ерофеев В. Т.</b> Исследование свойств каркасных композитов, армированных металлической фиброй различных видов                                                                  | 105 |
| <b>Леснов В. В.</b> Исследование физико-механических свойств наполненных матричных и клеевых составов для каркасных бетонов                                                                      | 111 |
| <b>Перехоженцев А. Г., Груздо И. Ю.</b> Исследование диффузии влаги в пористых строительных материалах                                                                                           | 116 |
| <b>Хирис Н. С., Акчури Т. К.</b> Формирование внутренней структуры мелкозернистого бетона высокой плотности и прочности при наполнении металлургическим шлаком и двухчастотном виброуплотнении   | 121 |
| <b>Черноусов Н. Н., Черноусов Р. Н., Суханов А. В., Бондарев Б. А.</b> Моделирование анкеровки гладкой фибровой арматуры в цементно-песчаном растворе                                            | 126 |
| <b>СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА</b>                                                                                                                                                                     |     |
| <b>Денисов И. В.</b> Верификация численного решения уравнения математического маятника                                                                                                           | 135 |
| <b>Игнатьев В. А., Ромашкин В. Н.</b> Определение редуцированного спектра частот и форм свободных колебаний систем с большим числом степеней свободы на основе сплайн-коллокационной конденсации | 140 |
| <b>ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ</b>                                                                                          |     |
| <b>Алексиков С. В., Карпушко М. О.</b> Модель оперативного управления ремонтом дорожных покрытий городских дорог                                                                                 | 152 |
| <b>Алексиков С. В., Симончук Д. Н.</b> Расчет увлажнения грунтовых резервов при сооружении земляного полотна автомобильных дорог                                                                 | 157 |
| <b>Анопин В. Н., Юферев В. Г., Рулев Г. А.</b> Технология мониторинга состояния полос отвода автомобильных дорог и придорожных территорий с использованием ГИС                                   | 160 |
| <b>Евтушенко С. И., Крахмальная М. П., Крахмальный Т. А.</b> К вопросу об остаточном ресурсе длительно эксплуатируемых мостов через водопроводящие каналы                                        | 166 |
| <b>Ермилов А. А., Алексиков С. В.</b> Однородность виброуплотнения асфальтобетонных покрытий при ремонте городских дорог                                                                         | 171 |
| <b>ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ</b>                                                                                                          |     |
| <b>Прилепский Д. В.</b> Конструктивные особенности камеры орошения с поперечным расположением форсунок                                                                                           | 177 |
| <b>Прилепский Д. В., Тарабанов М. Г., Фокин В. М.</b> Экспериментальное исследование воздушного вихря центробежных форсунок камер орошения в системах кондиционирования воздуха                  | 182 |
| <b>ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА</b>                                                                                                                                                 |     |
| <b>Дружинин К. В.</b> Воздействие ВПХГ в отложениях каменной соли на подземные воды                                                                                                              | 189 |
| <b>Жатикова М. С.</b> Учет фактора наличия историко-культурного наследия и особо охраняемых территорий при комплексном экологическом картографировании трассы магистрального газопровода         | 196 |
| <b>Прокопенко В. В., Ганжа О. А.</b> Разработка статистической модели оценки показателя качества ландшафтно-рекреационной территории на примере города Волгограда                                | 199 |
| <b>Сидоренко В. Ф., Сапожкова Н. В., Чеснокова А. Н.</b> Исследование загрязнения автотранспортом воздушной среды и почв вблизи дошкольных учреждений                                            | 203 |
| <b>Чебанова С. А., Азаров В. Н., Маринин Н. А., Воробьев В. И.</b> Об исследовании аэродинамических характеристик пыли зола в воздухе городов                                                    | 207 |
| <b>ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. ТЕОРИЯ РАЗВИТИЯ ГОРОДА</b>                                                                                                                                                |     |
| <b>Юшкова Н. Г.</b> Территориально-пространственная политика развития градостроительных систем регионов: ретроспектива законодательных основ                                                     | 212 |
| <b>ИННОВАЦИИ В СТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ, ИНТЕНСИФИКАЦИЯ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ</b>                                                                                             |     |
| <b>Боровик В. С., Боровик В. В.</b> Визуализация процесса прогнозирования результатов внедрения новой технологии в дорожном предприятии                                                          | 231 |
| <b>НАШИ АВТОРЫ</b>                                                                                                                                                                               | 239 |

## C o n t e n t

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

|                                                                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Bogomolov A. N., Ushakov A. N., Bogomolova O. A.</b> Stress state of elastic half-plane in case of evenly distributed load attached to the tool under finite friction magnitude on contact «tool — basis»       | 5  |
| <b>Bogomolov A. N., Bogomolova O. A., Ushakov A. N., Podlinev M. O.</b> Search of a rational contour of underground mine under condition of coulomb durability                                                     | 20 |
| <b>Bogomolov A. N., Ushakov A. N., Bogomolova O. A.</b> Stress state of elastic half-plane in case of inclined loading attached to the tool under condition of its full sticking to the rectilinear inclined basis | 27 |
| <b>Denisov I. V., Kharlanov V. L.</b> Modern seismic isolation systems for buildings                                                                                                                               | 44 |
| <b>Egorov V. V., Grigorev P. N.</b> About dynamic characteristics of strut frame                                                                                                                                   | 52 |
| <b>Kornienko S. V.</b> Temperature and humidity conditions and thermal properties of enclosing structures with edge zones                                                                                          | 62 |
| <b>Maslyayev A. V.</b> Health protection of the population in Russia in buildings at earthquake                                                                                                                    | 70 |
| <b>Medvedev D. P., Zakharov A. V.</b> Development of the regression equation of thermal conductivity dependence on density and moisture                                                                            | 79 |
| <b>Pshenichkina V. A., Sukhina K. N.</b> Methods of evaluation of residual resource of secondary trusses of the main corpus of JSC «Voltair-prom»                                                                  | 85 |

## BUILDING MATERIALS AND ARTICLES

|                                                                                                                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Zharkov A. F., Chesnokova O. G.</b> Calculation of influence of temperature and humidity on acc panels “Elevit”                                                                                             | 90  |
| <b>Kalashnikova A. S., Akchurin T. K., Pushkarskaya O. Yu.</b> Multicomponent polymer system for waterproofing of building structures                                                                          | 99  |
| <b>Lesnov V. V., Erofeev V. T.</b> Investigation of the properties of the carcass composites reinforced with metal fibre of different types                                                                    | 105 |
| <b>Lesnov V. V.</b> Research of physical and mechanical properties of filled matrix and adhesive compositions for carcass concrete                                                                             | 111 |
| <b>Perekhozhentsev A. G., Gruzdo I. Yu.</b> The study of moisture diffusion in porous construction materials                                                                                                   | 116 |
| <b>Khiris N. S., Akchurin T. K.</b> The formation of the internal structure of the fine-grained concrete with high density and strength when filling with metallurgical slag and two-frequency vibrocompaction | 121 |
| <b>Chernousov N. N., Chernousov R. N., Sukhanov A. V., Bondarev B. A.</b> Modeling of anchorage of plain fibrous bars in cement-sand mortar                                                                    | 126 |

## STRUCTURAL MECHANICS

|                                                                                                                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Denisov I. V.</b> Verification of numerical solution of equation of mathematical pendulum                                                                                                                              | 135 |
| <b>Ignatev V. A., Romashkin V. N.</b> Determination of the reduced range of frequencies and forms of free fluctuations of systems with large number of degrees of freedom on the basis of spline collocation condensation | 140 |

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

|                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Aleksikov S. V., Karpushko M. O.</b> Operational management model of city roads pavement repair                                                      | 152 |
| <b>Aleksikov S. V., Simonchuk D. N.</b> Calculation of moisture of soil reserves at the construction of motorway subgrade                               | 157 |
| <b>Anopin V. N., Yuferev V. G., Rulev G. A.</b> Technology of monitoring of the state of right of way and roadside territories using GIS                | 160 |
| <b>Evtushenko S. I., Krakhmalnaya M. P., Krakhmalny T. A.</b> To the issue of residual operation life of long operated bridges over water supply canals | 166 |
| <b>Ermilov A. A., Aleksikov S. V.</b> Homogeneity of vibrocompaction of asphalt concrete coverings when repairing city roads                            | 171 |

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

|                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Prilepskiy D. V.</b> Constructive peculiarities of a nozzle chamber with crossed configuration of nozzles                                         | 177 |
| <b>Prilepskiy D. V., Tarabanov M. G., Fokin V. M.</b> Experimental study of air swirl of centrifugal nozzles in chambers of air conditioning systems | 182 |

ENVIRONMENTAL ISSUES IN URBAN PLANNING

- Druzhinin K. V.** Impact of underground gas and oil storages in rock salt deposits on underground water 189
- Zhatikova M. S.** Accounting of the factor of historical and cultural heritage and specific protected areas when completing complex ecological mapping of the main gas pipeline route 196
- 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 199
- Sidorenko V. F., Sapozhkova N. V., Chesnokova A. N.** The research of air and soil pollution by motor transport near pre-school institutions 203
- Chebanova S. A., Azarov V. N., Marinin N. A., Vorobev V. I.** The study of aerodynamic characteristics of ash dust in the air of cities 207

URBAN PLANNING. THEORY OF URBAN DEVELOPMENT

- Yushkova N. G.** Territorial and spatial policy of the development of town-planning systems for the regions: retrospective of legislative bases 212

INNOVATIONS IN CONSTRUCTION, INTENSIFICATION, ENERGY SAVING AND ENERGY PERFORMANCE

- Borovik V. S., Borovik V. V.** Visualization of the prediction of the results of the new technology infusion into road enterprise 231

- OUR AUTHORS 239

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

УДК 624.131

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

**О НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ УПРУГОЙ ПОЛУПЛОСКОСТИ В СЛУЧАЕ  
РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКИ, ПРИЛОЖЕННОЙ К ШТАМПУ,  
ПРИ УСЛОВИИ КОНЕЧНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СИЛ ТРЕНИЯ ПО КОНТАКТУ  
«ШТАМП — ОСНОВАНИЕ»**

Приведено аналитическое решение задачи о штампе, находящемся под действием равномерно распределенной нагрузки при условии конечного значения сил трения, действующих по контакту «штамп — наклонное основание с прямолинейной границей». Даны формулы для вычисления контактных давлений и численных значений компонент напряжения, действующих в точках песчаного и глинистого основания. Приведены картины изолиний напряжений и контактных давлений, вычисленных при помощи полученных формул. Доказана симметричность полей напряжений при условии, что угол наклона основания к горизонту равен нулю.

**Ключевые слова:** однородное наклонное основание с прямолинейной границей, условие полного прилипания, бесконечно большое трение, компоненты напряжения, контактное давление, глинистое и песчаное основание.

The article provides the analytical task solution for the tool which is under the influence of evenly distributed load under finite friction magnitude on contact “tool — inclined basis with straight-line boundary”. Formulas to calculate friction force and numerical values the component of tension operating in points of sandy and clay basis are given. The pictures of stress isolines and contact pressure calculated with the help of the received formulas are demonstrated. Symmetry of stress fields under condition that tilt angle of the basis to the horizon is equal to zero is proved.

**Key words:** homogeneous inclined basis with rectilinear border, condition of full sticking, infinite friction, stress components, contact pressure, clay and sandy basis.

Рассмотрим абсолютно жесткий штамп с прямолинейным наклонным основанием, при условии, что на границе «штамп — грунт» коэффициент трения принимает постоянное значение. Будем предполагать, что главный вектор внешних сил, действующих на штамп, имеет вид

$$X = kP, Y = -P, \quad (1)$$

где  $P$  — заданная положительная величина;  $k$  — коэффициент трения, а основание штампа составляет с осью  $Ox$  угол  $\varepsilon$ , отсчитываемый от  $Ox$  в положительном направлении.

Необходимо определить напряженное состояние в нижней полуплоскости.

Будем считать, что отрезок  $L$  границы, соприкасающийся со штампом, расположен симметрично относительно начала координат и имеет длину  $2l$ , так что для точек  $t$  отрезка  $L$  имеем:  $-l \leq t \leq l$ .

Для решения поставленной задачи применим метод сопряжения, предложенный Н. И. Мусхелишвили [1].

Известно [1], что в случае плоской задачи теории упругости компоненты напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$  удовлетворяют следующим соотношениям:

$$\sigma_x + \sigma_y = 2 \left\{ \Phi(z) + \overline{\Phi(\bar{z})} \right\} = 4 \operatorname{Re} \Phi(z), \quad (2)$$

$$\sigma_y - \sigma_x + 2i\tau_{xy} = 2 \left\{ (\bar{z} - z) \Phi'(z) - \Phi(z) - \overline{\Phi(\bar{z})} \right\}. \quad (3)$$

Получим компоненты напряжения для наклонного штампа, основание которого составляет угол  $\varepsilon$  с осью  $Ox$  (рис. 1).

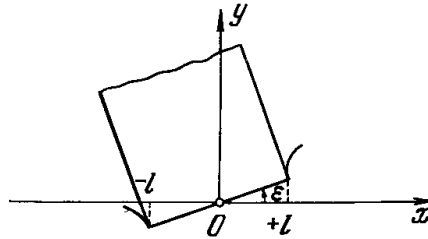


Рис. 1. Расчетная схема задачи (цит. по [1])

Функция напряжения для рассматриваемого случая [1, с. 434] имеет вид

$$\Phi(z) = \frac{(1+ik)e^{\pi i \alpha}}{2\pi(\aleph+1)} \frac{P(\aleph+1) - 8\pi\mu\varepsilon\alpha l - 4\pi\mu\varepsilon z}{(l+z)^{\frac{1}{2}+\alpha}(l-z)^{\frac{1}{2}-\alpha}} + \frac{2\mu\varepsilon i(1+ik)}{\aleph+1}, \quad (4)$$

где  $\mu$  — постоянная Ламе;  $\aleph$  — упругая постоянная, которая выражается через коэффициент Пуассона  $\nu$  по формуле  $\aleph = 3 - 4\nu$ , причем коэффициент Пуассона связан с коэффициентом бокового давления  $\xi_0$  соотношением  $\xi_0 = \frac{\nu}{1-\nu}$ ;  $\alpha$  — некоторая постоянная, связанная с коэффициентом трения  $k$  условием

$$\operatorname{tg} \pi \alpha = k \frac{\aleph - 1}{\aleph + 1}, \quad 0 \leq \alpha < \frac{1}{2}. \quad (5)$$

Значения  $\alpha = 0$  и  $\alpha = 1/2$  соответствуют случаю отсутствия трения и бесконечно большого его значения.

Перейдем к вычислению компонент напряжения.

Обозначим знаменатель второй дроби в (4) через  $X(z)$  и представим его в виде

$$X(z) = e^{\left(-\frac{1}{2}-\alpha\right)\ln(z+l)} e^{\left(-\frac{1}{2}+\alpha\right)\ln(-1)} e^{\left(-\frac{1}{2}+\alpha\right)\ln(z-l)}.$$

Поскольку логарифм является многозначной функцией, то для его определения положим  $z - t = \rho e^{-i\theta}$ , где  $\rho = |z - t|$ , а  $\theta$  обозначает угол, составляемый вектором, имеющим начало в  $t$ , а конец в  $z$ , с осью  $Ox$ , причем этот угол мы считаем заключенным между  $0$  и  $\pi$  и отсчитываем его от положительного направления  $Ox$  по часовой стрелке (рис. 2).

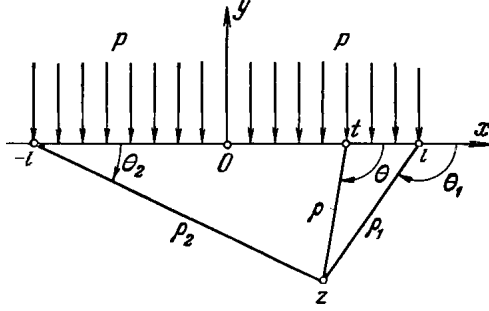


Рис. 2. Расчетная схема задачи (цит. по [1])

Тогда

$$\ln(z - t) = \ln \rho - i\theta,$$

значит,

$$\begin{aligned} \ln(z + l) &= \ln \rho_2 - i\theta_2, \quad \rho_2 = \sqrt{(l + x)^2 + y^2}, \quad \theta_2 = \arctg \frac{|y|}{l + x}, \\ \ln(z - l) &= \ln \rho_1 - i\theta_1, \quad \rho_1 = \sqrt{(l - x)^2 + y^2}, \quad \theta_1 = \pi - \arctg \frac{|y|}{l - x}. \end{aligned} \quad (6)$$

Прямые вычисления функции напряжения (4) дают

$$\begin{aligned} \Phi(z) &= \frac{P}{2\pi(\aleph + 1)\sqrt{\rho_1\rho_2}} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha \left[ (m_1 \cos r - m_2 \sin r) + i(m_2 \cos r + m_1 \sin r) \right] + \\ &\quad + \frac{2\mu\varepsilon(i - k)}{\aleph + 1}, \\ \bar{\Phi}(z) &= -\frac{P}{2\pi(\aleph + 1)\sqrt{\rho_1\rho_2}} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha \left[ (\bar{m}_1 \cos r - \bar{m}_2 \sin r) + i(\bar{m}_2 \cos r + \bar{m}_1 \sin r) \right] - \\ &\quad - \frac{2\mu\varepsilon(k + i)}{\aleph + 1}, \\ \Phi'(z) &= \frac{P}{2\pi(\aleph + 1)} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha \left[ \left( \frac{4\pi\mu\varepsilon}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} (\sin r + k \cos r) - km_3 - m_4 \right) + \right. \\ &\quad \left. + i \left( \frac{4\pi\mu\varepsilon}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} (k \sin r - \cos r) + m_3 - km_4 \right) \right], \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 m_1 &= -kP(\aleph+1) + 4\pi\mu\varepsilon(2k\alpha l + y + kx), \quad m_2 = P(\aleph+1) + 4\pi\mu\varepsilon(ky - x - 2\alpha l), \\
 \overline{m}_1 &= kP(\aleph+1) + 4\pi\mu\varepsilon(y - 2k\alpha l - kx), \quad \overline{m}_2 = P(\aleph+1) - 4\pi\mu\varepsilon(ky + 2\alpha l + x), \\
 m_3 &= P(\aleph+1)l_2 - 4\pi\mu\varepsilon(2\alpha ll_2 - xl_2 - yl_1), \\
 m_4 &= -P(\aleph+1)l_1 + 4\pi\mu\varepsilon(2\alpha ll_1 + xl_1 - yl_2), \\
 l_1 &= -(h_1 \sin s + h_2 \sin t), \quad l_2 = h_1 \cos s + h_2 \cos t, \\
 h_1 &= -\left(\frac{1}{2} + \alpha\right) \frac{1}{\rho_2 \sqrt{\rho_1 \rho_2}}, \quad h_2 = \left(-\frac{1}{2} + \alpha\right) \frac{1}{\rho_1 \sqrt{\rho_1 \rho_2}}, \\
 r &= \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} + \alpha(\theta_2 - \theta_1), \quad s = \frac{\theta_1 + 3\theta_2}{2} + \alpha(\theta_2 - \theta_1), \quad t = \frac{3\theta_1 + \theta_2}{2} + \alpha(\theta_2 - \theta_1),
 \end{aligned}$$

а  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\theta_1$  и  $\theta_2$  вычисляются по формулам (6).

После соответствующей подстановки соотношения (2) и (3) примут вид

$$\begin{aligned}
 \sigma_x + \sigma_y &= \frac{2}{\pi(\aleph+1)\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^\alpha (m_1 \cos r - m_2 \sin r) - \frac{8\mu\varepsilon k}{\aleph+1}, \\
 \sigma_y - \sigma_x + 2i\tau_{xy} &= 2 \left\{ \frac{y}{\pi(\aleph+1)} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^\alpha \left[ \left( \frac{4\pi\mu\varepsilon}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} (k \sin r - \cos r) + m_3 - km_4 \right) - \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - i \left( \frac{4\pi\mu\varepsilon}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} (\sin r + k \cos r) - km_3 - m_4 \right) \right] + \frac{4\mu\varepsilon k}{\aleph+1} + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{\pi(\aleph+1)\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^\alpha \times \right. \\
 &\quad \left. \times \left[ (Pk(\aleph+1) - 4\pi\mu\varepsilon k(2\alpha l + x)) \cos r + 4\pi\mu\varepsilon ky \sin r + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + i((Pk(\aleph+1) - 4\pi\mu\varepsilon k(2\alpha l + x)) \sin r - 4\pi\mu\varepsilon ky \cos r) \right] \right\},
 \end{aligned}$$

откуда для компонент напряжения имеем

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= -\frac{y}{\pi(\aleph+1)} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^\alpha \left( \frac{4\pi\mu\varepsilon}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} (k \sin r - \cos r) + m_3 - km_4 \right) - \frac{8\mu\varepsilon k}{\aleph+1} - \\
 &\quad - \frac{1}{\pi(\aleph+1)\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^\alpha \times \\
 &\quad \times \left[ (2kP(\aleph+1) + 4\pi\mu\varepsilon(2k\alpha l + 2y + kx)) \cos r + (P(\aleph+1) + \right. \\
 &\quad \left. + 4\pi\mu\varepsilon(2ky - x - 2\alpha l)) \sin r \right],
 \end{aligned} \tag{7}$$



$$\sigma_y = \frac{y}{\pi(\aleph+1)} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha \left( \frac{4\pi\mu\varepsilon}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} (k \sin r - \cos r) + m_3 - km_4 \right) +$$

$$+ \frac{1}{\pi(\aleph+1)\sqrt{\rho_1\rho_2}} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha \left[ (4\pi\mu\varepsilon y) \cos r - (P(\aleph+1) + 4\pi\mu\varepsilon(x + 2\alpha l)) \sin r \right],$$

(8)

$$\tau_{xy} = -\frac{y}{\pi(\aleph+1)} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha \left( \frac{4\pi\mu\varepsilon}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} (\sin r + k \cos r) - km_3 - m_4 \right) +$$

$$+ \frac{1}{\pi(\aleph+1)\sqrt{\rho_1\rho_2}} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha \left[ (kP(\aleph+1) - 4\pi\mu\varepsilon(2k\alpha l + kx)) \sin r - (4\pi\mu\varepsilon ky) \cos r \right].$$

(9)

Между значением  $\varepsilon$  и главным моментом внешних сил, действующих на штамп, в [1, с. 434] установлена связь при помощи соотношения

$$M = 2\alpha l P + \frac{2\pi\mu(1-4\alpha^2)l^2}{\aleph+1} \varepsilon,$$

откуда

$$\varepsilon = \frac{(M - 2\alpha l P)(\aleph+1)}{2\pi\mu(1-4\alpha^2)l^2}. \quad (10)$$

Используя (10), заметим, что компоненты напряжения (7)–(9) принимают вид

$$\sigma_x = -\frac{y}{\pi} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha \left( \frac{2(M - 2\alpha l P)}{\sqrt{\rho_1\rho_2}(1-4\alpha^2)l^2} (k \sin r - \cos r) + m_3^* - km_4^* \right) -$$

$$- \frac{4k(M - 2\alpha l P)}{\pi(1-4\alpha^2)l^2} - \frac{1}{\pi\sqrt{\rho_1\rho_2}} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha \left[ \left( 2kP + \frac{2(M - 2\alpha l P)}{(1-4\alpha^2)l^2} (2k\alpha l + 2y + kx) \right) \cos r + \right. \quad (7')$$

$$\left. + \left( P + \frac{2(M - 2\alpha l P)}{(1-4\alpha^2)l^2} (2ky - x - 2\alpha l) \right) \sin r \right],$$

$$\sigma_y = \frac{y}{\pi} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha \left( \frac{2(M - 2\alpha l P)}{\sqrt{\rho_1\rho_2}(1-4\alpha^2)l^2} (k \sin r - \cos r) + m_3^* - km_4^* \right) +$$

$$+ \frac{1}{\pi\sqrt{\rho_1\rho_2}} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha \left[ \frac{2y(M - 2\alpha l P)}{(1-4\alpha^2)l^2} \cos r - \left( P + \frac{2(M - 2\alpha l P)}{(1-4\alpha^2)l^2} (x + 2\alpha l) \right) \sin r \right], \quad (8')$$

$$\tau_{xy} = -\frac{y}{\pi} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha \left( \frac{2(M - 2\alpha l P)}{\sqrt{\rho_1\rho_2}(1-4\alpha^2)l^2} (\sin r + k \cos r) - km_3^* - m_4^* \right) +$$

$$+ \frac{1}{\pi\sqrt{\rho_1\rho_2}} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha \left[ \left( kP - \frac{2(M - 2\alpha l P)}{(1-4\alpha^2)l^2} (2k\alpha l + kx) \right) \sin r - \frac{2ky(M - 2\alpha l P)}{(1-4\alpha^2)l^2} \cos r \right], \quad (9')$$

где

$$m_3^* = Pl_2 - \frac{2(M - 2\alpha lP)}{(1 - 4\alpha^2)l^2} (2\alpha ll_2 - xl_2 - yl_1),$$

$$m_4^* = -Pl_1 + \frac{2(M - 2\alpha lP)}{(1 - 4\alpha^2)l^2} (2\alpha ll_1 + xl_1 - yl_2).$$

При отсутствии трения из формул (7')—(9') с учетом соотношения (5) получаем

$$\begin{aligned} \sigma_x = & -\frac{y}{\pi} \left( m_{3\alpha}^* - \frac{2M}{\sqrt{\rho_1 \rho_2} l^2} \cos \left( \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \right) - \\ & - \frac{1}{\pi \sqrt{\rho_1 \rho_2}} \left[ \frac{4My}{l^2} \cos \left( \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) + \left( P - \frac{2Mx}{l^2} \right) \sin \left( \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \right], \end{aligned} \quad (7')$$

$$\begin{aligned} \sigma_y = & \frac{y}{\pi} \left( m_{3\alpha}^* - \frac{2M}{\sqrt{\rho_1 \rho_2} l^2} \cos \left( \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \right) + \\ & + \frac{1}{\pi \sqrt{\rho_1 \rho_2}} \left[ \frac{2My}{l^2} \cos \left( \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) - \left( P + \frac{2Mx}{l^2} \right) \sin \left( \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \right], \end{aligned} \quad (8')$$

$$\tau_{xy} = -\frac{y}{\pi} \left( \frac{2M}{\sqrt{\rho_1 \rho_2} l^2} \cos \left( \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) - m_{4\alpha}^* \right), \quad (9')$$

где

$$\begin{aligned} m_{3\alpha}^* = Pl_2 + \frac{2M}{l^2} (xl_{2\alpha} + yl_{1\alpha}), \quad m_{4\alpha}^* = -Pl_1 + \frac{2M}{l^2} (xl_{1\alpha} - yl_{2\alpha}), \\ l_{1\alpha} = \frac{1}{2\rho_1 \rho_2 \sqrt{\rho_1 \rho_2}} \left( \rho_1 \sin \left( \frac{\theta_1 + 3\theta_2}{2} \right) + \rho_2 \sin \left( \frac{3\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \right), \end{aligned} \quad (11)$$

причем

$$l_{2\alpha} = -\frac{1}{2\rho_1 \rho_2 \sqrt{\rho_1 \rho_2}} \left( \rho_1 \cos \left( \frac{\theta_1 + 3\theta_2}{2} \right) + \rho_2 \cos \left( \frac{3\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \right). \quad (12)$$

Если  $M = 0$ , т. е. в случае, когда внешние силы, действующие на штамп, эквивалентны одной силе, приложенной в середине основания, соотношения (7')—(9') и (7')—(9') соответствующим образом упрощаются.

Полагая  $\varepsilon = 0$ , получим штамп с прямолинейным горизонтальным основанием. Тогда из формул (7)—(9) при наличии трения получаем

$$\sigma_x = -\frac{Py}{\pi} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha (l_2 + kl_1) - \frac{P}{\pi} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} (\sin r + 2k \cos r), \quad (13)$$

$$\sigma_y = \frac{Py}{\pi} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha (l_2 + kl_1) - \frac{P}{\pi} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \sin r, \quad (14)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{Py}{\pi} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha (l_1 - kl_2) + \frac{P}{\pi} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} k \sin r. \quad (15)$$

В случае его отсутствия формулы (13)—(15) упрощаются и имеют вид

$$\sigma_x = -\frac{Py}{\pi} l_{2\alpha} - \frac{P}{\pi} \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \sin \left( \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right), \quad (13')$$

$$\sigma_y = \frac{Py}{\pi} l_{2\alpha} - \frac{P}{\pi} \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \sin \left( \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right), \quad (14')$$

$$\tau_{xy} = -\frac{Py}{\pi} l_{1\alpha}, \quad (15')$$

где  $l_{1\alpha}$  и  $l_{2\alpha}$  определяются формулами (11) и (12).

Формулы (13)—(15) были получены в [2].

На рис. 3—5 приведены изолинии горизонтальных, вертикальных и касательных напряжений, полученных на основании формул (7')—(9') при  $l = 10$ ,  $\alpha = 0,01$  (глинистый грунт) и конкретных значениях параметров. Коэффициент трения бетона по грунту, согласно [3], принят равным  $k = 0,25$ .

Изолинии, изображенные на рис. 3—5 (ж—з), соответствуют случаю  $\varepsilon = 0$  и могли быть также получены на основании формул (13)—(15) и (13')—(15') при постоянном ненулевом и нулевом значениях коэффициента трения соответственно. Нетрудно увидеть, что картины изолиний всех трех компонент напряжения асимметричны.

В работах [2] показано, что при действии вертикальной нагрузки постоянной интенсивности, приложенной к абсолютно жесткому штампу с прямолинейным горизонтальным основанием, имитирующему фундамент сооружения, в случае конечного коэффициента трения картины изолиний всех трех компонент напряжения в однородном и изотропном основании симметричны относительно вертикальной оси, что согласуется с расчетными схемами Л. Прандтля и Р. Хилла, и предопределяет двусторонний выпор грунта из-под штампа. Этот вывод был сделан на основании того, что компоненты напряжения (13)—(15) обладают симметрией относительно  $\alpha$  и  $x$ , т. е.

$$\sigma_x(-\alpha, -x, y) = \sigma_x(\alpha, x, y),$$

$$\sigma_y(-\alpha, -x, y) = \sigma_y(\alpha, x, y),$$

$$\tau_{xy}(-\alpha, -x, y) = -\tau_{xy}(\alpha, x, y).$$

Используя известные формулы перехода от одной прямоугольной системы координат к другой, аналогично [2] можно показать, что при повороте системы координат на некоторый заданный угол симметрия компонент напряжения в новой системе координат также сохранится.

Приведенные выше рассуждения показывают, что компоненты напряжения (7)—(9) при  $\varepsilon = 0$  должны перейти в компоненты напряжения (13)—(15) с картинами изолиний, симметричными относительно оси ординат. Значит, поле напряжения в случае прямолинейного наклонного штампа соответствует искажению симметричного поля напряжения, создаваемого приложенной к прямолинейному горизонтальному штампу вертикальной силой заданной интенсивности. На рис. 6—8 на основании формул (7')—(9') и приведенных выше рассуждений построены картины изолиний компонент напряжения при  $l = 10$ ,  $\alpha = 0,01$  (глинистый грунт) и заданных параметрах.

Теперь, исходя из полученных формул для компонент напряжения, получим формулы давления для точек  $t$  под наклонным штампом.

Полагая в формуле (6)

$$y = 0, \quad x = t, \quad \theta_1 = \pi, \quad \theta_2 = 0, \quad \rho_1 = |l - t|, \quad \rho_2 = |l + t|,$$

получим формулу для давления  $P(t) = -\sigma_y$ , действующего на границу полуплоскости, т. е.

$$P(t) = \frac{\cos \pi \alpha}{\pi(\aleph + 1)} \frac{P(\aleph + 1) - 8\pi\mu\varepsilon l - 4\pi\mu\varepsilon t}{(l - t)^{\frac{1}{2}-\alpha} (l + t)^{\frac{1}{2}+\alpha}}. \quad (16)$$

Полагая в (16)  $\varepsilon = 0$ , имеем формулу давления под горизонтальным штампом

$$P(t) = \frac{P}{\pi} \left( \frac{l - t}{l + t} \right)^\alpha \frac{\cos \pi \alpha}{\sqrt{l^2 - t^2}} = \frac{P \cos \pi \alpha}{\pi (l - t)^{\frac{1}{2}-\alpha} (l + t)^{\frac{1}{2}+\alpha}}. \quad (17)$$

При отсутствии трения, т. е. при  $\alpha = 0$  эти формулы принимают вид

$$P(t) = \frac{P(\aleph + 1) - 4\pi\mu\varepsilon t}{\pi(\aleph + 1)\sqrt{l^2 - t^2}},$$

и соответственно

$$P(t) = \frac{P}{\pi\sqrt{l^2 - t^2}}.$$

Формулы (16) и (17) были получены Н. И. Мусхелишвили [1, с. 433, 434].

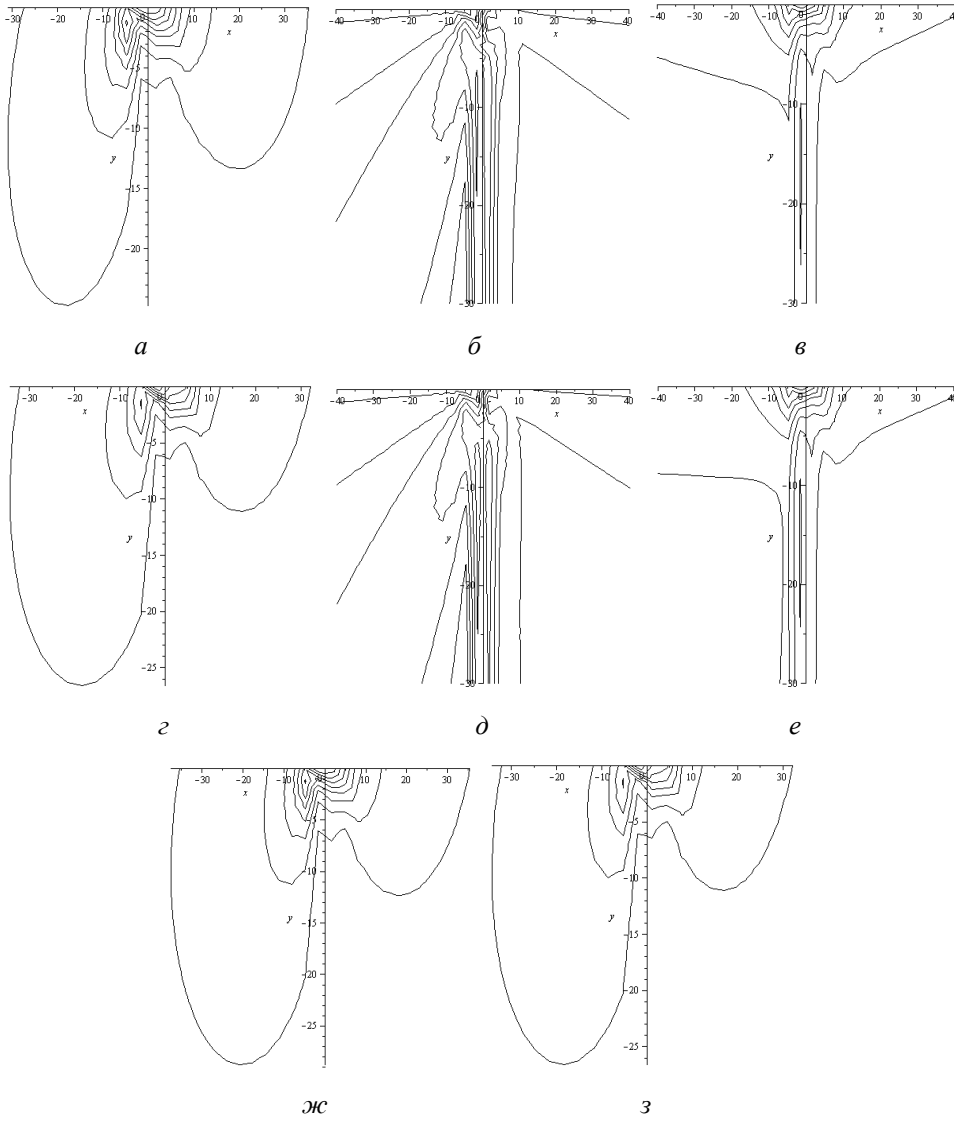


Рис. 3. Изолинии горизонтального напряжения: при  $a$  —  $P=1$ ,  $M=0$ ,  $\alpha=0,01$ ;  $б$  —  $M=0$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0,01$ ;  $в$  —  $M=1$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0,01$ ;  $г$  —  $P=1$ ,  $M=0$ ,  $\alpha=0$ ;  $д$  —  $M=0$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0$ ;  $е$  —  $M=1$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0$ ;  $ж$  —  $P=1$ ,  $M=0,06$ ,  $\alpha=0,01$ ;  $з$  —  $P=1$ ,  $M=0$ ,  $\alpha=0$

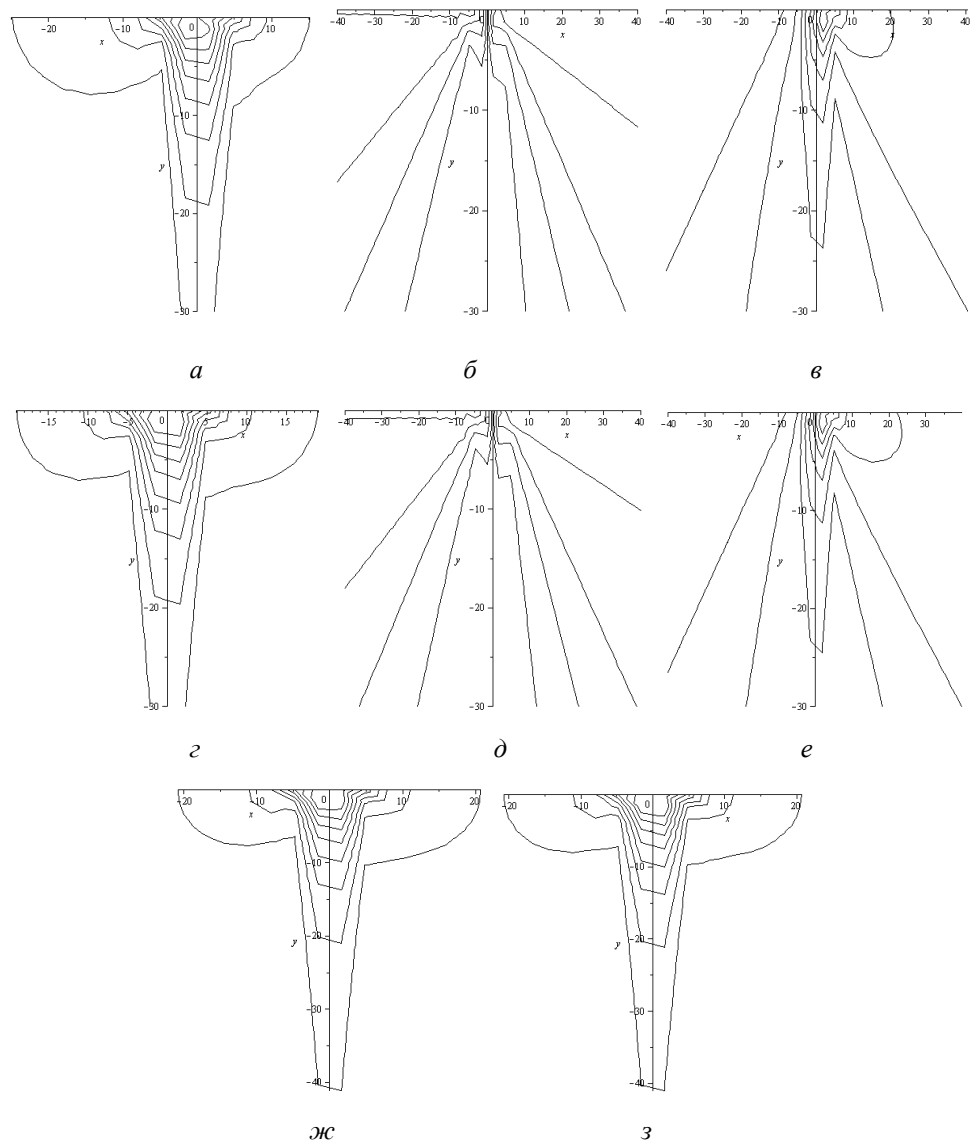


Рис. 4. Изолинии вертикального напряжения: при  $a$  —  $P=1$ ,  $M=0$ ,  $\alpha=0,01$ ;  $б$  —  $M=0$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0,01$ ;  $в$  —  $M=1$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0,01$ ;  $г$  —  $P=1$ ,  $M=0$ ,  $\alpha=0$ ;  $д$  —  $M=0$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0$ ;  $е$  —  $M=1$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0$ ;  $жс$  —  $P=1$ ,  $M=0,06$ ,  $\alpha=0,01$ ;  $з$  —  $P=1$ ,  $M=0$ ,  $\alpha=0$

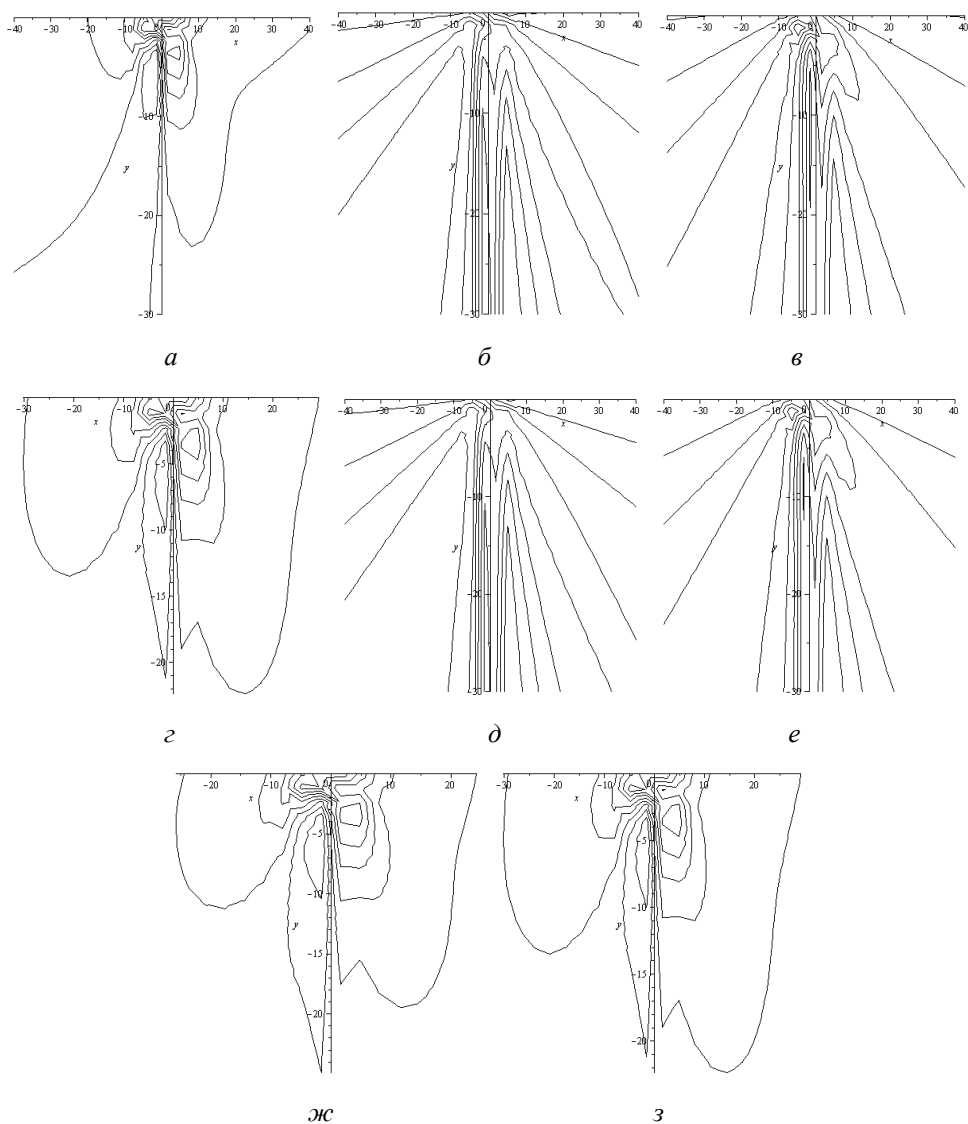


Рис. 5. Изолинии касательного напряжения: при  $a$  —  $P=1$ ,  $M=0$ ,  $\alpha=0,01$ ;  $б$  —  $M=0$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0,01$ ;  $в$  —  $M=1$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0,01$ ;  $г$  —  $P=1$ ,  $M=0$ ,  $\alpha=0$ ;  $д$  —  $M=0$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0$ ;  $е$  —  $M=1$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0$ ;  $ж$  —  $P=1$ ,  $M=0,06$ ,  $\alpha=0,01$ ;  $з$  —  $P=1$ ,  $M=0$ ,  $\alpha=0$

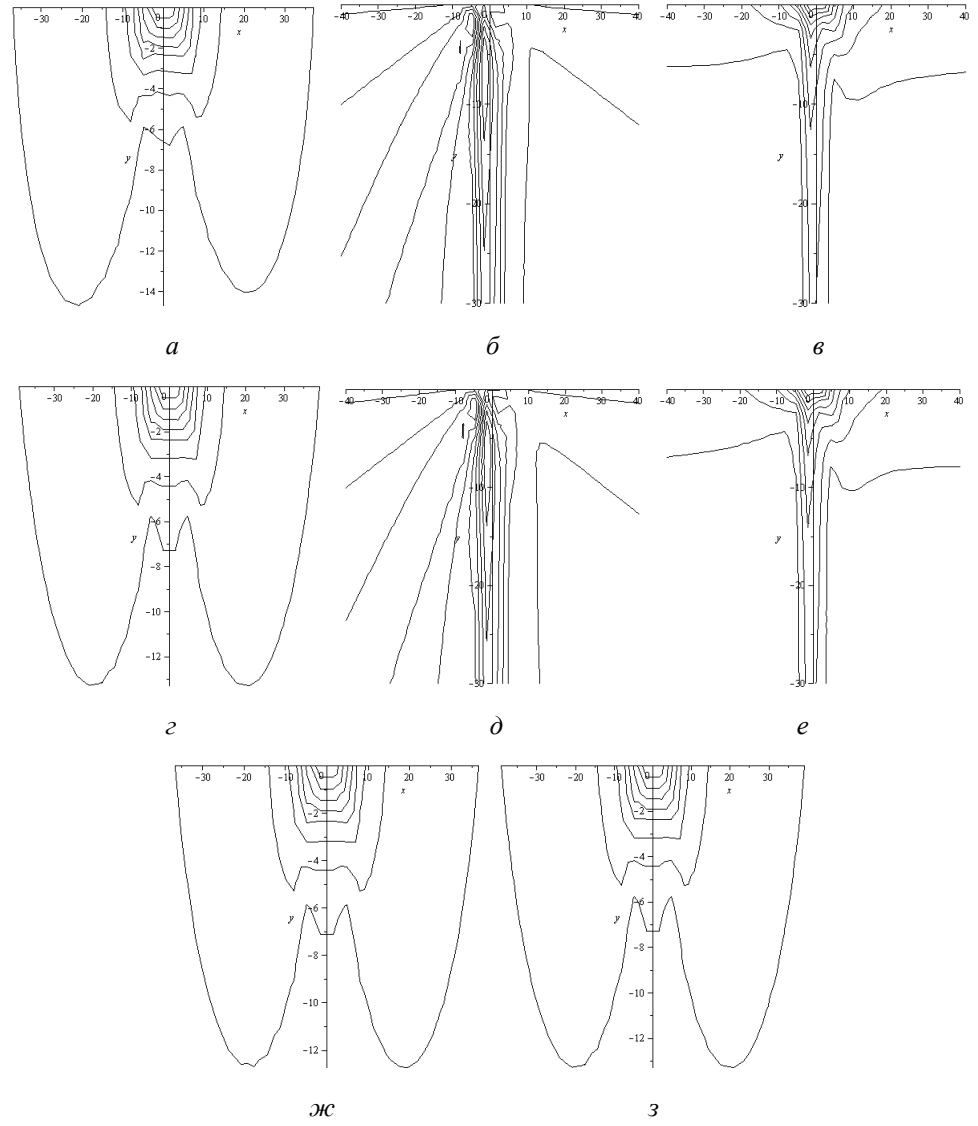


Рис. 6. Изолинии горизонтального напряжения: при  $a$  —  $P=1$ ,  $M=0$ ,  $\alpha=0,01$ ;  $\bar{b}$  —  $M=0$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0,01$ ;  $\bar{в}$  —  $M=1$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0,01$ ;  $\bar{г}$  —  $P=1$ ,  $M=0$ ,  $\alpha=0$ ;  $\bar{д}$  —  $M=0$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0$ ;  $\bar{е}$  —  $M=1$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0$ ;  $\bar{ж}$  —  $P=1$ ,  $M=0,06$ ,  $\alpha=0,01$ ;  $\bar{з}$  —  $P=1$ ,  $M=0$ ,  $\alpha=0$



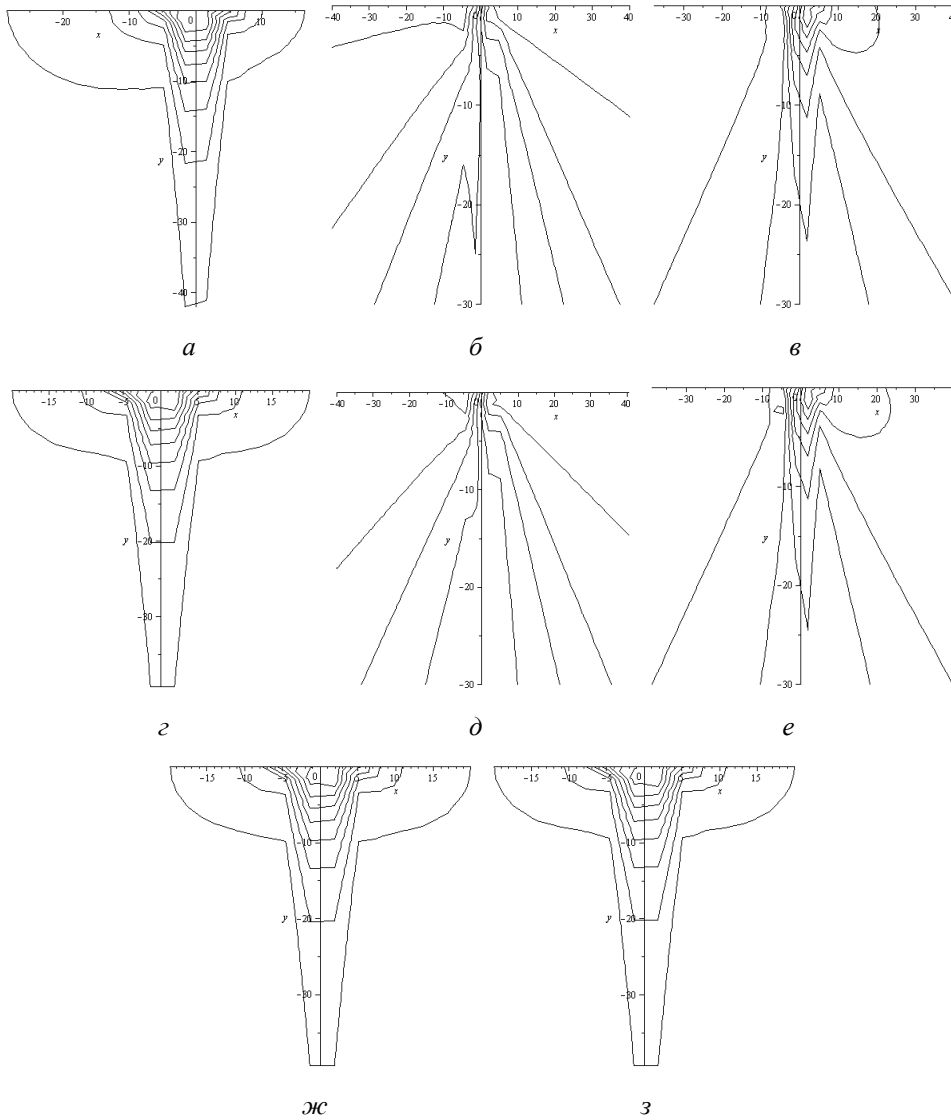


Рис. 7. Изолинии вертикального напряжения: при  $a$  —  $P=1$ ,  $M=0$ ,  $\alpha=0,01$ ;  $б$  —  $M=0$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0,01$ ;  $в$  —  $M=1$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0,01$ ;  $г$  —  $P=1$ ,  $M=0$ ,  $\alpha=0$ ;  $д$  —  $M=0$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0$ ;  $е$  —  $M=1$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0$ ;  $ж$  —  $P=1$ ,  $M=0,06$ ,  $\alpha=0,01$ ;  $з$  —  $P=1$ ,  $M=0$ ,  $\alpha=0$

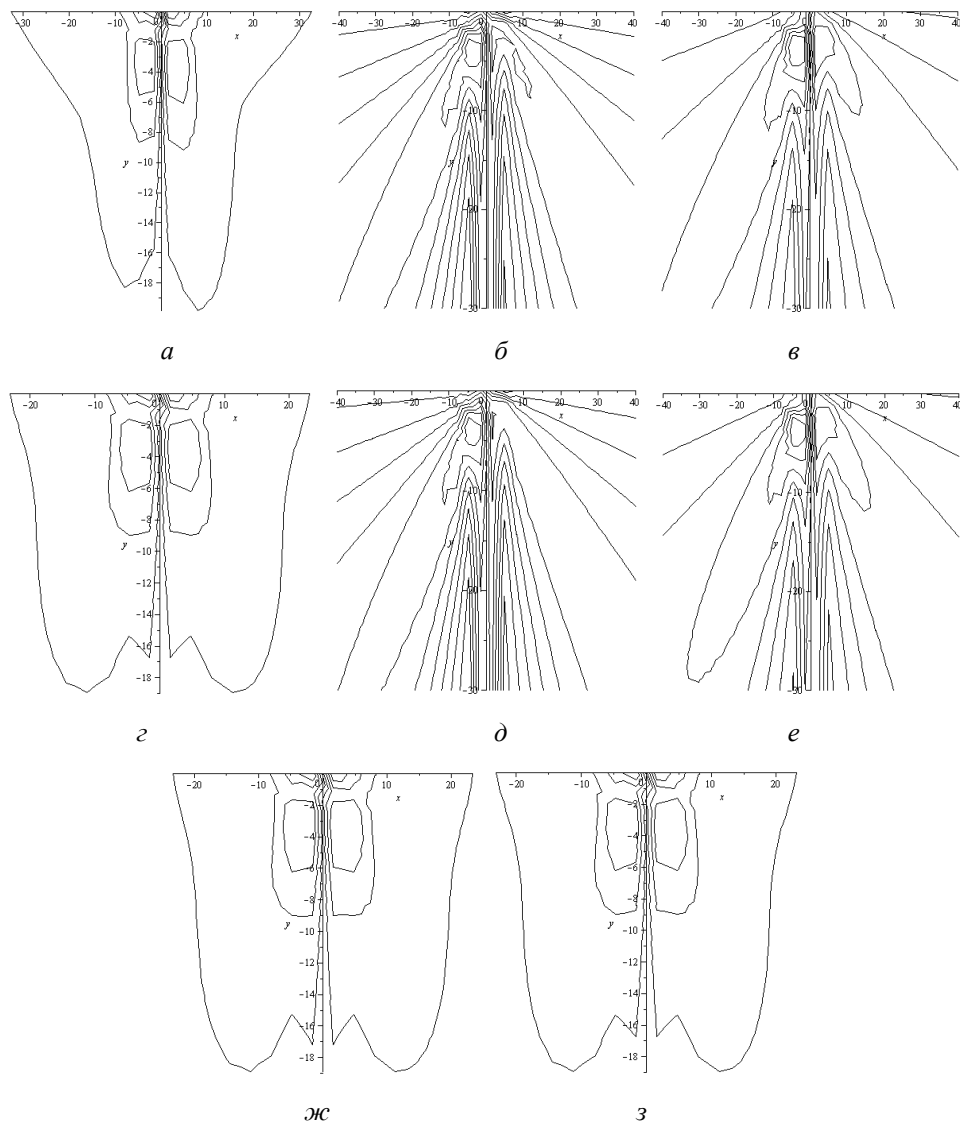


Рис. 8. Изолинии касательного напряжения: при *a* —  $P=1$ ,  $M=0$ ,  $\alpha=0,01$ ; *б* —  $M=0$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0,01$ ; *в* —  $M=1$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0,01$ ; *г* —  $P=1$ ,  $M=0$ ,  $\alpha=0$ ; *д* —  $M=0$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0$ ; *е* —  $M=1$ ,  $P=1$ ,  $\alpha=0$ ; *ж* —  $P=1$ ,  $M=0,06$ ,  $\alpha=0,01$ ; *з* —  $P=1$ ,  $M=0$ ,  $\alpha=0$

---

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М. : Наука, 1966. 707 с.
2. Богомолов А. Н., Ушаков А. Н., Богомолова О. А. О симметрии компонент напряжения в однородном и изотропном основании абсолютно жесткого штампа при конечном значении коэффициента трения по контакту «штамп — грунт» // Изв. ТулГУ. Сер.: Естеств. науки. 2013. Вып. 3. С. 317—322.
3. Справочник проектировщика. Основания, фундаменты и подземные сооружения / М. И. Горбунов-Посадов, В. А. Ильичев, В. И. Крутов и др. ; под общ. ред. Е. А. Сорочана и Ю. Г. Трофименкова. М. : Стройиздат, 1985.
1. Muskhelishvili N. I. Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti. M. : Nauka, 1966. 707 s.
2. Bogomolov A. N., Ushakov A. N., Bogomolova O. A. O simmetrii komponent napryazheniya v odnorodnom i izotropnom osnovanii absolyutno zhestkogo shtampa pri konechnom znachenii koeffitsienta treniya po kontaktu «shtamp — grunt» // Izv. TulGU. Ser.: Estestv. nauki. 2013. Vyp. 3. S. 317—322.
3. Spravochnik proektirovshchika. Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya / M. I. Gorbunov-Posadov, V. A. Il'ichev, V. I. Krutov i dr. ; pod obshch. red. E. A. Sorochana i Yu. G. Trofimenkova. M. : Stroyizdat, 1985.

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

Поступила в редакцию  
в декабре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Богомолов А. Н., Ушаков А. Н., Богомолова О. А. О напряженном состоянии упругой полуплоскости в случае равномерно распределенной нагрузки, приложенной к штампу, при условии конечной величины сил трения по контакту «штамп — основание» // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 5—19.

УДК 624.131;505:5

**А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, А. Н. Ушаков, М. О. Подлинев**

### **ОТЫСКАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО КОНТУРА ПОДЗЕМНОЙ ВЫРАБОТКИ НА ОСНОВЕ УСЛОВИЯ ПРОЧНОСТИ КУЛОНА**

Приведены результаты отыскания рационального контура подземной выработки с точки зрения прочности и устойчивости, на основе использования условия прочности Кулона. Приведены 3D зависимости, позволяющие найти максимальную безопасную глубину заложения выработки, при которой на ее контуре отсутствуют области предельного состояния (разрушения) грунта. Сделан вывод о том, что выработка, имеющая свод в виде половины астроида, является предпочтительной по отношению к другим рассмотренным, в смысле прочности и устойчивости.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** напряженное состояние вмещающего массива, формы и рациональные формы сечения подземных выработок, области предельного состояния грунта, безопасная глубина заложения выработки.

The results of search of a rational contour of underground mine from the point of view of durability and stability under condition of Coulomb durability are presented. 3D characteristics allowing to find the maximum safe depth of mine location when there are no areas of a limit soil state (destruction) on its contour are given. The make the conclusion that the mine which has the half-astroid shaped arch is preferable in relation to other considered ones in terms of durability and stability.

**Key words:** stress state of inclosing massif, form and rational forms of section of underground mine, areas of limit soil state, safe depth of mine location.

XXI век знаменует собой быстрый рост городов и городских территорий. Вместе с ними увеличивается численность населения, что влечет за собой проявление таких проблем, как затрудненность передвижения населения по городу, ухудшение экологической ситуации, замедление экономического роста городов и т. д. Основной причиной возникновения этих проблем считается увеличившийся грузовой и пассажирский трафик по существующим транспортным магистралям, не рассчитанным на все возрастающую нагрузку. Одним из решений, позволяющих разгрузить транспортную сеть, является строительство подземных сооружений и транспортных коммуникаций.

В качестве примера можно привести реализованный в США проект Большого Бостонский тоннеля, стоимость которого оценивается в \$14 000 000 000. Строительство тоннеля улучшило экологическую обстановку в городе: так, например, уровень угарного газа снизился на 12 %.

В течение последнего десятилетия и в Москве осуществляются крупнейшие проекты по переустройству транспортных магистралей города. При реализации таких программ удельный вес тоннелей достаточно весом. В составе крупных транспортных развязок впервые построено несколько сложнейших переходов под железными дорогами. При этом использована технология защитного экрана из труб с длиной каждого перехода в несколько десятков метров. Прокладка труб методом микротоннелирования для подобных задач на сегодня является основной.

По состоянию на настоящее время в Москве построено 8...10 тоннелей, один тоннель — в районе С.-Петербурга и два — в Перми. С помощью щитового комплекса фирмы «Херренкнехт» диаметром 14 м в Москве в кратчай-

шие сроки построен крупнейший городской автодорожный Лефортовский тоннель длиной 3,3 км. Подобное подземное сооружение — новый тип городской автомагистрали большой протяженности, пересекающей крупные городские районы без вредных воздействий на все многообразные элементы городской среды [1].

Подземное строительство обладает одним явным недостатком — большой стоимостью проведения строительных работ. Однако исследования, проведенные в Великобритании в 2001 г., показали, что благодаря новым технологиям стоимость туннельного строительства падает с темпом около 4 % в год [1].

В настоящее время самой распространенной и технологичной формой подземного сечения является прямоугольная, поскольку ее устройство требует наименьших затрат и средств, а вся ее площадь может полезно использоваться. Но при наличии бокового давления в выработках быстро теряется устойчивость и возникает необходимость перехода на другие формы. В случае интенсивного давления сверху и с боков применяют арочные или сводчатые формы подземных выработок [2].

В настоящей статье рассмотрены три возможные формы сечения потолочины сводчатых подземных сооружений: астроидальная, круглая и эллиптическая (рис. 1).

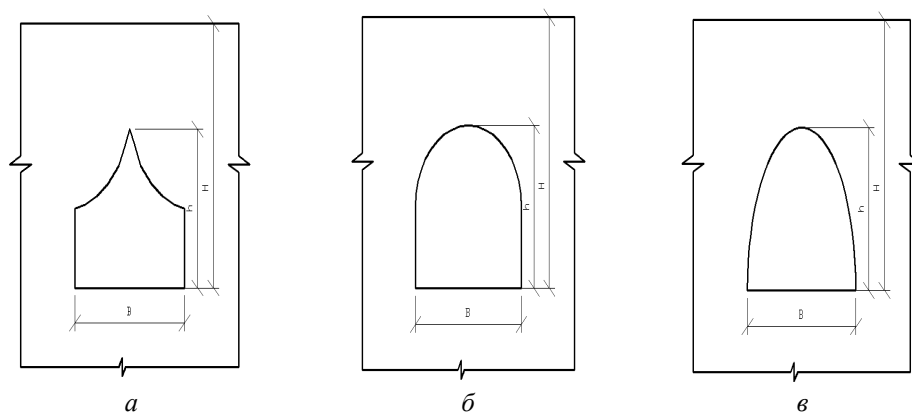


Рис. 1. Формы сечений подземных выработок с потолочиной в виде половины астроида (а), полукруга (б) и половины эллипса (в)

При проведении расчетов принято, что выработки имеют одинаковую высоту  $h$  и равные по длине основания  $B$ , причем  $B = h/2 = 3,5$  м.

Считаем, что выработки проходят в глинистом грунте, физико-механические характеристики которого изменяются в следующих пределах: удельный вес  $\gamma = 2$  т/м<sup>3</sup>, модуль деформации  $E_0 = 5...20$  МПа, коэффициент бокового давления  $\xi_0 = 0,7$ , удельное сцепление  $C = 0,04...0,228$  МПа, угол внутреннего трения  $\phi = 12...28^\circ$  [3—6].

Напряженное состояние вмещающего массива, положение, размеры и форму областей предельного состояния грунта на контуре выработки определяем при помощи компьютерной программы [7], в которой для определения напряжений в неоднородных областях формализован метод конечных

элементов, а границы областей предельного состояния грунта определяются как линии, в каждой точке которых величина коэффициента запаса устойчивости равна единице [7], т. е.

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

где  $\sigma_z$ ,  $\sigma_x$ ,  $\tau_{xz}$  и  $\alpha$  — безразмерные (в долях  $\gamma H$ ) компоненты напряжения и угол наклона к горизонту наиболее вероятной площадки сдвига в рассматриваемой точке грунтового массива;  $\sigma_{св} = C(\gamma H \operatorname{tg} \varphi)^{-1}$  — приведенное давление связности ( $C$ ,  $\gamma$ ,  $\varphi$  и  $H$  — соответственно удельное сцепление, объемный вес, угол внутреннего трения грунта и глубина заложения выработки).

Отметим, что условие (1) получено из условия прочности Кулона [7].

Целью работы является определение такой максимальной глубины для каждого вида сечения выработки, при которой на ее контуре будут отсутствовать области предельного состояния грунта, т. е. процесс разрушения выработок не будет запущен [8].

На рис. 2 приведены картины изолиний безразмерных (в долях  $\gamma H$ ) компонент напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$  и  $\tau_{xz}$  в окрестности выработок.

Из рис. 2 видно, что степень концентрации напряжений вокруг выработок разной формы различна, что обусловит, при всех прочих равных условиях, отличия в протекании процесса образования и развития областей пластических деформаций, начало которого для рассматриваемых форм выработок приведено на рис. 3.

На основании анализа результатов выполненных расчетов, аналогичных приведенным в работах [9—12], можно сказать, что контур со сводом в виде половины астроида является предпочтительным с точки зрения величины безопасной глубины заложения.

Так, при  $\gamma = 2 \text{ т/м}^3$ ;  $E_0 = 18 \text{ МПа}$ ;  $\xi_0 = 0,7$ ;  $C = 0,2 \text{ МПа}$ ;  $\varphi = 12^\circ$  области предельного состояния грунта начинают возникать в случае астроидального свода при глубине заложения выработки  $H_{аст} = 10 \text{ м}$ , для круглого свода  $H_{круг} = 9,6 \text{ м}$ , а для свода в виде половины эллипса  $H_{эллипс} = 9,3 \text{ м}$ .

В результате вычислений построены кривые, позволяющие определить по известным значениям угла внутреннего трения  $\varphi$ , давления связности  $\sigma_{св}$ , предельную глубину заложения выработки, при которой на ее контуре отсутствуют области предельного состояния грунта, т. е. она не будет разрушаться даже при отсутствии крепи.

На рис. 4 в качестве примера приведены эти кривые для выработки со сводом в виде половины астроида.

Используя эти кривые, а также соответствующие кривые для выработок со сводами в виде полукруга и полуэллипса, построены 3D графики (поверхности), при помощи которых, используя метод линейной интерполяции, можно решить задачу об определении глубины заложения выработок рассматриваемых сечений, при которой на их контурах отсутствуют области предельного состояния грунта (рис. 5).

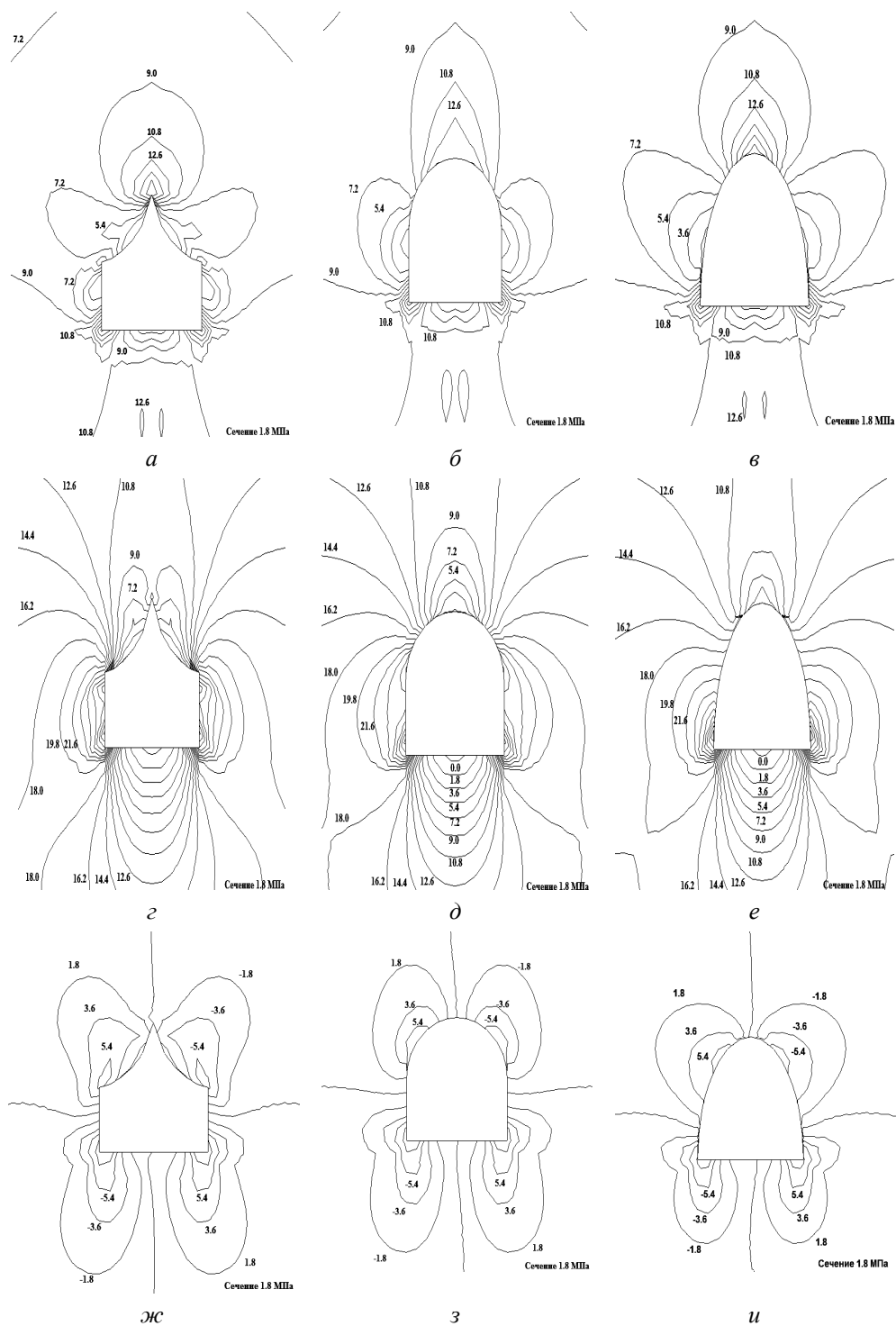


Рис. 2. Картины изолиний горизонтальных  $\sigma_x$  (а—в); вертикальных  $\sigma_z$  (г—е) и касательных  $\tau_{xz}$  (ж—и) напряжений в окрестности выработки со сводом в виде половины астроида, полукруга и половины эллипса соответственно

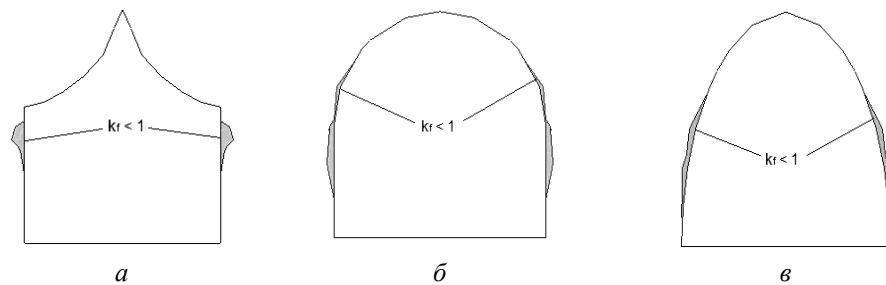


Рис. 3. Начало процесса образования и развития областей предельного состояния грунта на контуре выработки со сводом в виде половины астроида (*а*); полукруга (*б*) и полуэллипса (*в*)

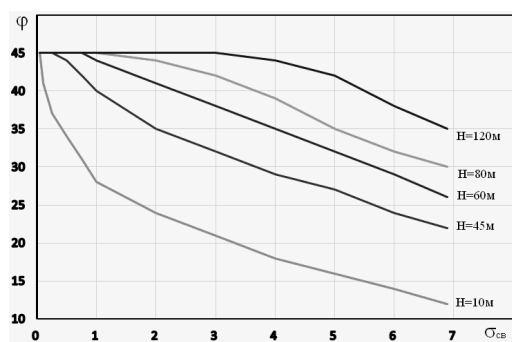


Рис. 4. Графики для определения безопасной глубины заложения выработки со сводом в виде половины астроида

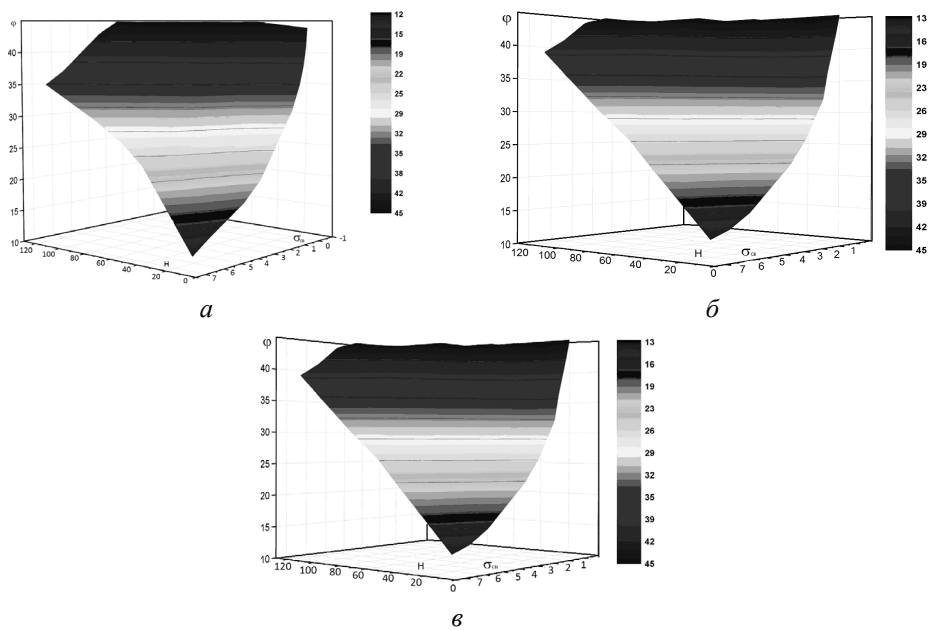


Рис. 5. 3D графики для определения предельной глубины заложения горизонтальной подземной выработки со сводом в виде половины астроида (*а*), полукруга (*б*) и полуэллипса (*в*)



Рассмотрим некоторые результаты, полученные при помощи приведенных выше 3D зависимостей:

а) безопасные глубины заложения — максимальные глубины заложения, на которых контуры выработок еще свободны от областей предельного состояния грунта, — для выработки со сводом в виде половины астроида, полукруга и полуэллипса соответственно равны:  $H_{\text{астр}} \approx 16$  м,  $H_{\text{круг}} \approx 13$  м и  $H_{\text{эллипс}} \approx 14$  м;

б) если глубина заложения всех трех выработок одинаковая и равна  $H = 10$  м, а приведенное давление связности  $\sigma_{\text{св}} = 4$ , то для того, чтобы на контурах не зарождались области предельного состояния, необходимо, чтобы угол внутреннего трения вмещающего грунта для полуастроидальной, полукруглой и полуэллиптической выработок был соответственно равен  $\varphi_{\text{астр}} = 18^\circ$ ,  $\varphi_{\text{круг}} = 19^\circ$  и  $\varphi_{\text{эллипс}} = 20^\circ$ .

в) если глубина заложения упомянутых выше трех выработок одинакова и равна  $H = 10$  м, а величина угла внутреннего трения во всех случаях одинакова и равна  $\varphi = 20^\circ$ , то области пластических деформаций на контуре выработок будут отсутствовать, если приведенные давления связности будут соответственно равны  $\sigma_{\text{св}}^{\text{астр}} \approx 3,3$ ,  $\sigma_{\text{св}}^{\text{круг}} \approx 3,7$  и  $\sigma_{\text{св}}^{\text{эллипс}} \approx 3,8$ .

Анализируя все изложенное и приведенные выше результаты, можно сделать следующие выводы:

1. Получены 3D зависимости, позволяющие определить максимальную безопасную глубину заложения горизонтальных выработок для любых сочетаний физико-механических свойств вмещающего грунтового массива, рассмотренных в настоящей статье.

2. Горизонтальная выработка со сводом в виде половины астроида предпочтительна по отношению к двум другим с точки зрения прочности и устойчивости.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лысков Б. А., Кауфман Л. Л. Подземные структуры. Донецк : Норд-Пресс, 2005. 281 с.
2. Храпов В. Г. Тоннели и метрополитены. М. : Транспорт, 1989. 372 с.
3. Сыркин П. С., Мартыненко И. А. Шахтное и подземное строительство. Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2002. 447 с.
4. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга / Р. Э. Дашко, О. Ю. Александрова, П. В. Котюков, А. В. Шидловская // Развитие городов и геотехническое строительство. 2011. № 13. С. 19—20.
5. Трофимов В. Т., Королев В. А. Грунтоведение. М. : Наука, 2005. 1024 с.
6. Богомолов А. Н. Расчет несущей способности оснований сооружений и устойчивости грунтовых массивов в упругопластической постановке. Пермь : ПГТУ, 1996.
7. 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. Потапова и др. ; опубл. 18.12.2009, Бюл. № 23 ; заявл. 19.05.2009 ; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 30.06.2009. 1 с.
8. Новый критерий оценки длительной устойчивости однородных откосов на основе анализа напряженно-деформированного состояния / А. Н. Богомолов, М. Ю. Нестратов, А. В. Соловьев, С. И. Шиян // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр.-во и архит. Волгоград : Изд-во ВолгГАСУ, 2009. Вып. 14(33). С. 5—12.
9. Анализ напряженного состояния грунтового массива, вмещающего подземные пространства различной конфигурации / А. Н. Богомолов, С. В. Кузнецова, В. Н. Синяков, М. А. Шубин и др. // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строит. информатика. 2012. Вып. 8(24). Режим доступа: [www.vestnik.vgasu.ru](http://www.vestnik.vgasu.ru) (дата обращения: 12.01.2014).

10. Определение предельной глубины заложения горизонтальных выработок различного поперечного сечения / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, М. А. Шубин, Д. В. Павлов и др. // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2013. Вып. 2(27). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/BogomolovBogomolovaShubinPavlovPodlinevSolovev-2013\\_2\(27\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/BogomolovBogomolovaShubinPavlovPodlinevSolovev-2013_2(27).pdf) (дата обращения : 12.01.2014)

11. Пример определения безопасной глубины заложения горизонтальной выработки сложного сечения / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, С. Л. Шелудько, А. В. Соловьев // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 33(52). С. 6—12.

12. Постановка задачи «о восстановлении сечения контура» подземной выработки / А. Н. Богомолов, А. Н. Ушаков, Д. В. Павлов, М. О. Подлинев, А. В. Прокопенко // Геология, поиск и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований : материалы Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием «Геонауки — 2013: актуальные проблемы изучения недр». Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2013. Вып. 13. 400 с.

1. *Lysikov B. A., Kaufman L. L.* Podzemnye struktury. Donetsk : Nord-Press, 2005. 281 s.

2. *Khrapov V. G.* Tonneli i metropoliteny. M. : Transport, 1989. 372 s.

3. *Syrkin P. S., Martynenko I. A.* Shakhtnoe i podzemnoe stroitel'stvo. Novocherkassk : YuRGU (NPI), 2002. 447 s.

4. Osobennosti inzhenerno-geologicheskikh usloviy Sankt-Peterburga / R. E. Dashko, O. Yu. Aleksandrova, P. V. Kotyukov, A. B. Shidlovskaya // Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo. 2011. № 13. S. 19—20.

5. *Trofimov V. T., Korolev V. A.* Gruntovedenie. M. : Nauka, 2005. 1024 s.

6. *Bogomolov A. N.* Raschet nesushchey sposobnosti osnovaniy sooruzheniy i ustoychivosti gruntovykh massivov v uprugoplasticheskoy postanovke. Perm' : PGU, 1996.

7. Ustoychivost' (napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie) : svidetel'stvo o gos. registratsii programmy dlya EVM : pat. Ros. Federatsii № 2009613499 / A. N. Bogomolov, O. A. Bogomolova, M. Yu. Nestratov, N. N. Potapova i dr. ; opubl. 18.12.2009, Byul. № 23 ; zayavl. 19.05.2009 ; zareg. v Reestre programm dlya EVM 30.06.2009. 1 s.

8. Novyy kriteriy otsenki dlitel'noy ustoychivosti odnorodnykh otkosov na osnove analiza napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya / A. N. Bogomolov, M. Yu. Nestratov, A. V. Solov'ev, S. I. Shiyan // Vestnik Volgogr. gos. arkh.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkh. Volgograd : Izd-vo VolgASU, 2009. Vyp. 14(33). S. 5—12.

9. Analiz napryazhennogo sostoyaniya gruntovogo massiva, vmeshchayushchego podzemnye pro-stranstva razlichnoy konfiguratsii / A. N. Bogomolov, S. V. Kuznetsova, V. N. Sinyakov, M. A. Shubin i dr. // Internet-vestnik VolgASU. Ser.: Stroitel'stvo i informatika. 2012. Vyp. 8(24). Rezhim dostupa: [www.vestnik.vgasu.ru](http://www.vestnik.vgasu.ru) (data obrashcheniya: 12.01.2014).

10. Opreделение predel'noy glubiny zalozheniya gorizonta'nykh vyrabotok razlichnogo poperechnogo secheniya / A. N. Bogomolov, O. A. Bogomolova, M. A. Shubin, D. V. Pavlov i dr. // Internet-vestnik VolgASU. Ser.: Politematicheskaya. 2013. Vyp. 2(27). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/BogomolovBogomolovaShubinPavlovPodlinevSolovev-2013\\_2\(27\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/BogomolovBogomolovaShubinPavlovPodlinevSolovev-2013_2(27).pdf) (data obrashcheniya : 12.01.2014)

11. Primer opredeleniya bezopasnoy glubiny zalozheniya gorizonta'noy vyrabotki slozhnogo secheniya / A. N. Bogomolov, O. A. Bogomolova, S. L. Shelud'ko, A. V. Solov'ev // Vestnik Volgogr. gos. arkh.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkh. 2013. Vyp. 33(52). S. 6—12.

12. Postanovka zadachi «o vosstanovlenii secheniya kontura» podzemnoy vyrabotki / A. N. Bogomolov, A. N. Ushakov, D. V. Pavlov, M. O. Podlinev, A. V. Prokopenko // Geologiya, poisk i razvedka poleznykh iskopaemykh i metody geologicheskikh issledovaniy : materialy Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunarodnym uchastiem «Geonauki — 2013: aktual'nye problemy izucheniya neдр». Irkutsk : Izd-vo IrGTU, 2013. Vyp. 13. 400 s.

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

Поступила в редакцию  
в декабре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Отыскание рационального контура подземной выработки на основе условия прочности Кулона / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, А. Н. Ушаков, М. О. Подлинев // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 20—26.

УДК 624.131

**А. Н. Богомолов, А. Н. Ушаков, О. А. Богомолова****НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ УПРУГОЙ ПОЛУПЛОСКОСТИ В СЛУЧАЕ НАКЛОННОЙ НАГРУЗКИ, ПРИЛОЖЕННОЙ К ШТАМПУ, ПРИ УСЛОВИИ ЕГО ПОЛНОГО ПРИЛИПАНИЯ К ПРЯМОЛИНЕЙНОМУ НАКЛОННОМУ ОСНОВАНИЮ**

Приведено аналитическое решение задачи о штампе, находящемся под действием равномерно распределенной наклонной нагрузки при условии его полного прилипания к наклонному основанию с прямолинейной границей. Даны формулы для вычисления контактных давлений и численных значений компонент напряжения, действующих в точках песчаного и глинистого основания. Приведены картины изолиний напряжений и контактных давлений, вычисленных при помощи полученных формул.

**Ключевые слова:** однородное наклонное основание с прямолинейной границей, условие полного прилипания, бесконечно большое трение, компоненты напряжения, контактное давление, глинистое и песчаное основание.

The article provides the analytical task solution for the tool which is under the influence of evenly distributed inclined loading under condition of its full sticking to the inclined basis with rectilinear border. Formulas to calculate contact pressure and numerical values the component of tension operating in points of sandy and clay basis are given. The pictures of stress isolines and contact pressure calculated with the help of the received formulas are demonstrated.

**Key words:** homogeneous inclined basis with rectilinear border, condition of full sticking, infinite friction, stress components, contact pressure, clay and sandy basis.

Рассмотрим штамп с прямолинейным наклонным основанием, параллельным оси  $Ox$ , предполагая, что внешние силы, действующие на штамп, имеют равнодействующую вида

$$X = q, \quad Y = -p, \quad (1)$$

где  $q$  и  $p$  — заданные положительные постоянные величины, а основание штампа составляет с осью  $Ox$  угол  $\varepsilon$ , отсчитываемый от  $Ox$  в положительном направлении.

Необходимо определить напряженное состояние в нижней полуплоскости.

Будем считать, что отрезок  $L$  границы, соприкасающийся со штампом, расположен симметрично относительно начала координат и имеет длину  $2l$ , так что для точек  $t$  отрезка  $L$  имеем:  $-l \leq t \leq l$ .

Для решения поставленной задачи применим метод сопряжения, предложенный Н. И. Мусхелишвили [1].

Следуя [1], отметим, что в случае плоской задачи теории упругости компоненты напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$  удовлетворяют следующим соотношениям:

$$\sigma_x + \sigma_y = 2 \left\{ \Phi(z) + \overline{\Phi(z)} \right\} = 4 \operatorname{Re} \Phi(z), \quad (2)$$

$$\sigma_y - \sigma_x + 2i\tau_{xy} = 2 \left\{ (\bar{z} - z) \Phi'(z) - \Phi(z) - \overline{\Phi(z)} \right\}. \quad (3)$$

Для начала получим компоненты напряжения для наклонного штампа, основание которого составляет угол  $\varepsilon$  с осью  $Ox$  в предположении, что главный вектор внешних сил, действующих на штамп, равен нулю (рис. 1).

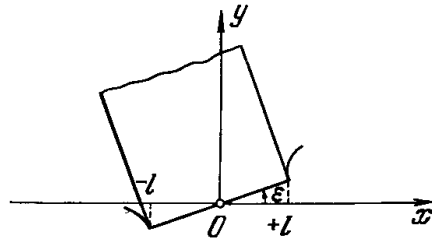


Рис. 1. Расчетная схема задачи (цит. по [1])

Согласно [1, с. 418] функция напряжения имеет вид

$$\Phi_1(z) = \frac{2\mu\epsilon i}{\aleph + 1} (1 - (z - 2\beta li) X(z)),$$

где

$$X(z) = (z + l)^{\frac{1}{2} + \beta i} (z - l)^{\frac{1}{2} - \beta i}, \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\ln \aleph}{2\pi}, \quad (5)$$

здесь  $\aleph$  — упругая постоянная, которая выражается через коэффициент Пуассона  $\nu$  по формуле  $\aleph = 3 - 4\nu$ , причем коэффициент Пуассона связан с коэффициентом бокового давления  $\xi_0$  соотношением  $\xi_0 = \frac{\nu}{1 - \nu}$ .

Перейдем к вычислению компонент напряжения. Для начала представим функцию (4) в виде

$$X(z) = e^{\left(\frac{1}{2} + i\beta\right) \ln(z+l)} e^{\left(\frac{1}{2} - i\beta\right) \ln(z-l)}.$$

Поскольку логарифм является многозначной функцией, то для его определения положим  $z - t = \rho e^{-i\theta}$ , где  $\rho = |z - t|$ , а  $\theta$  обозначает угол, составляемый вектором, имеющим начало в  $t$ , а конец в  $z$ , с осью  $Ox$ , причем этот угол мы считаем заключенным между 0 и  $\pi$  и отсчитываем его от положительного направления  $Ox$  по часовой стрелке (рис. 2).

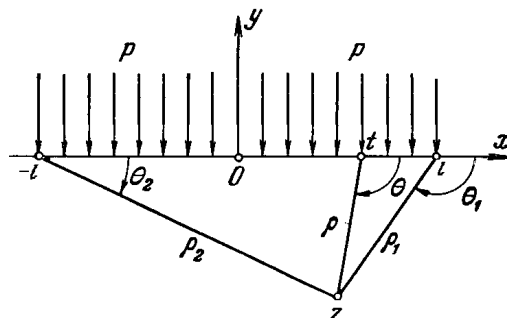


Рис. 2. Расчетная схема задачи (цит. по [1])

Тогда

$$\ln(z-t) = \ln \rho - i\theta,$$

значит,

$$\begin{aligned} \ln(z+l) &= \ln \rho_2 - i\theta_2, \quad \rho_2 = \sqrt{(l+x)^2 + y^2}, \quad \theta_2 = \arctg \frac{|y|}{l+x}, \\ \ln(z-l) &= \ln \rho_1 - i\theta_1, \quad \rho_1 = \sqrt{(l-x)^2 + y^2}, \quad \theta_1 = \pi - \arctg \frac{|y|}{l-x}. \end{aligned} \quad (6)$$

Прямые вычисления для функции напряжения  $\Phi_1(z)$  дают

$$\begin{aligned} \Phi_1(z) &= \frac{2\mu\varepsilon}{\aleph+1} \left( \frac{e^{\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} (xw_2 + (y-2\beta l)w_1) + i \left( 1 - \frac{e^{\beta(\theta_2-\theta_2)}}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} (xw_1 - (y-2\beta l)w_2) \right) \right), \\ \bar{\Phi}_1(z) &= -\frac{2\mu\varepsilon}{\aleph+1} \left( \frac{e^{-\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} (x\bar{w}_2 + (y+2\beta l)\bar{w}_1) + i \left( 1 - \frac{e^{-\beta(\theta_2-\theta_2)}}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} (x\bar{w}_1 - (y+2\beta l)\bar{w}_2) \right) \right), \\ \Phi_1'(z) &= \frac{2\mu\varepsilon}{\aleph+1} \frac{e^{\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\rho_1\rho_2\sqrt{\rho_1\rho_2}} \left( [\rho_1\rho_2w_2 + (y-2\beta l)R - xN] - i[\rho_1\rho_2w_1 + (y-2\beta l)N + xR] \right), \end{aligned}$$

где

$$R = \rho_1\gamma_1 + \rho_2\gamma_2, \quad N = \rho_1\delta_1 + \rho_2\delta_2,$$

$$w_1 = \cos\left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} + \beta \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}\right), \quad w_2 = \sin\left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} + \beta \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}\right),$$

$$\bar{w}_1 = \cos\left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - \beta \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}\right), \quad \bar{w}_2 = \sin\left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - \beta \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}\right),$$

$$\delta_1 = -\beta \cos\left(\frac{\theta_1 + 3\theta_2}{2} + \beta \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}\right) + \frac{1}{2} \sin\left(\frac{\theta_1 + 3\theta_2}{2} + \beta \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}\right),$$

$$\delta_2 = \beta \cos\left(\frac{3\theta_1 + \theta_2}{2} + \beta \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}\right) + \frac{1}{2} \sin\left(\frac{3\theta_1 + \theta_2}{2} + \beta \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}\right),$$

$$\gamma_1 = -\beta \sin\left(\frac{\theta_1 + 3\theta_2}{2} + \beta \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}\right) - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\theta_1 + 3\theta_2}{2} + \beta \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}\right),$$

$$\gamma_2 = \beta \sin\left(\frac{3\theta_1 + \theta_2}{2} + \beta \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}\right) - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{3\theta_1 + \theta_2}{2} + \beta \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}\right).$$

С учетом приведенных выражений соотношения (2) и (3) примут вид

$$\sigma_x + \sigma_y = \frac{8\mu\varepsilon}{\aleph+1} \frac{e^{\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} (xw_2 + (y-2\beta l)w_1),$$

$$\begin{aligned} \sigma_y - \sigma_x + 2i\tau_{xy} = & -2 \left\{ \frac{4\mu\epsilon y}{\aleph+1} \frac{e^{\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\rho_1\rho_2\sqrt{\rho_1\rho_2}} (\rho_1\rho_2 w + xR + (y-2\beta l)N) + \right. \\ & + \frac{2\mu\epsilon}{\aleph+1} \left( \frac{e^{\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} (xw_2 + (y-2\beta l)w_1) - \frac{e^{-\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} ((y+2\beta l)\bar{w}_1 + x\bar{w}_2) \right) - \\ & - \frac{2\mu\epsilon i}{\aleph+1} \left( \frac{e^{\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} (xw_1 - (y-2\beta l)w_2) - \frac{e^{-\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} (x\bar{w}_1 - (y-2\beta l)\bar{w}_2) \right) + \\ & \left. + \frac{4\mu\epsilon i}{\aleph+1} \frac{e^{\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\rho_1\rho_2\sqrt{\rho_1\rho_2}} (\rho_1\rho_2 w_2 + (y-2\beta l)R - xN) \right\}. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \sigma_x = & \frac{6\mu\epsilon}{\aleph+1} \frac{e^{\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} (xw_2 + (y-2\beta l)w_1) + \\ & + \frac{4\mu\epsilon y}{\aleph+1} \frac{e^{\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\rho_1\rho_2\sqrt{\rho_1\rho_2}} (\rho_1\rho_2 w_1 + xR + (y-2\beta l)N) - \\ & - \frac{2\mu\epsilon}{\aleph+1} \frac{e^{-\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} ((y+2\beta l)\bar{w}_1 + x\bar{w}_2), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sigma_y = & \frac{2\mu\epsilon}{\aleph+1} \frac{e^{\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} (xw_2 + (y-2\beta l)w_1) - \\ & - \frac{4\mu\epsilon y}{\aleph+1} \frac{e^{\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\rho_1\rho_2\sqrt{\rho_1\rho_2}} (\rho_1\rho_2 w_1 + xR + (y-2\beta l)N) + \\ & + \frac{2\mu\epsilon}{\aleph+1} \frac{e^{-\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} ((y+2\beta l)\bar{w}_1 + x\bar{w}_2), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \tau_{xy} = & \frac{2\mu\epsilon}{\aleph+1} \left( \frac{e^{\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} (xw_1 - (y-2\beta l)w_2) - \frac{e^{-\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} (x\bar{w}_1 - (y+2\beta l)\bar{w}_2) \right) - \\ & - \frac{4\mu\epsilon y}{\aleph+1} \frac{e^{\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} (\rho_1\rho_2 w_2 + (y-2\beta l)R - xN). \end{aligned} \quad (9)$$

Н. И. Мухелишвили показал [1, с. 420], что при заданном моменте  $M$  пары внешних сил угол  $\epsilon$  наклона определяется по формуле

$$\epsilon = \frac{\aleph+1}{2\pi\mu(1+4\beta^2)l^2} M. \quad (10)$$

Тогда формулы (7)—(9) с учетом (10) принимают вид

$$\begin{aligned}\sigma_x = & \frac{3M}{\pi(1+4\beta^2)l^2} \frac{e^{\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} (xw_2 + (y-2\beta l)w_1) + \\ & + \frac{2yM}{\pi(1+4\beta^2)l^2} \frac{e^{\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\rho_1\rho_2\sqrt{\rho_1\rho_2}} (\rho_1\rho_2w_1 + xR + (y-2\beta l)N) - \\ & - \frac{M}{\pi(1+4\beta^2)l^2} \frac{e^{-\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} ((y+2\beta l)\bar{w}_1 + x\bar{w}_2),\end{aligned}\quad (7')$$

$$\begin{aligned}\sigma_y = & \frac{M}{\pi(1+4\beta^2)l^2} \frac{e^{\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} (xw_2 + (y-2\beta l)w_1) - \\ & - \frac{2yM}{\pi(1+4\beta^2)l^2} \frac{e^{\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\rho_1\rho_2\sqrt{\rho_1\rho_2}} (\rho_1\rho_2w_1 + xR + (y-2\beta l)N) + \\ & + \frac{M}{\pi(1+4\beta^2)l^2} \frac{e^{-\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} ((y+2\beta l)\bar{w}_1 + x\bar{w}_2),\end{aligned}\quad (8')$$

$$\begin{aligned}\tau_{xy} = & \frac{M}{\pi(1+4\beta^2)l^2} \left( \frac{e^{\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} (xw_1 - (y-2\beta l)w_2) - \frac{e^{-\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\sqrt{\rho_1\rho_2}} (x\bar{w}_1 - (y+2\beta l)\bar{w}_2) \right) - \\ & - \frac{2yM}{\pi(1+4\beta^2)l^2} \frac{e^{\beta(\theta_2-\theta_1)}}{\rho_1\rho_2\sqrt{\rho_1\rho_2}} (\rho_1\rho_2w_2 + (y-2\beta l)R - xN).\end{aligned}\quad (9')$$

На рис. 3—5 приведены изолинии горизонтальных, вертикальных и касательных напряжений, построенные на основании формул (7')—(9') при  $l = 10$  и конкретных значениях параметров.

Значения  $\beta$  получены из формулы (5) с учетом коэффициента Пуассона  $\nu$ , значения которого, согласно [2], примем равными 0,42 и 0,3 для глины и песка соответственно.

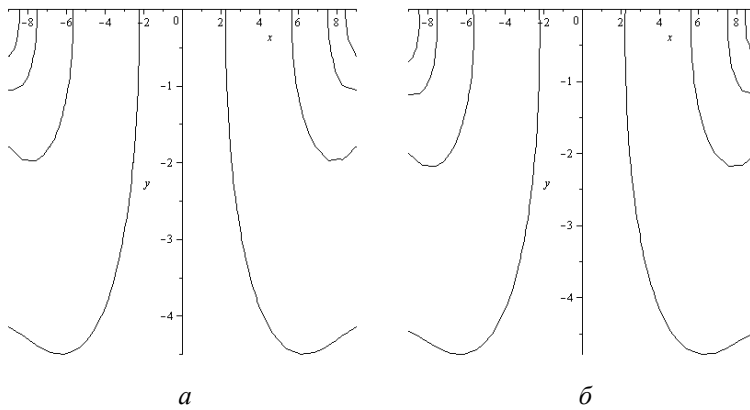


Рис. 3. Изолинии горизонтального напряжения: при  $a$  —  $\beta = 0,044$  (глина),  $M = 1$ ;  $b$  —  $\beta = 0,094$  (песок),  $M = 1$

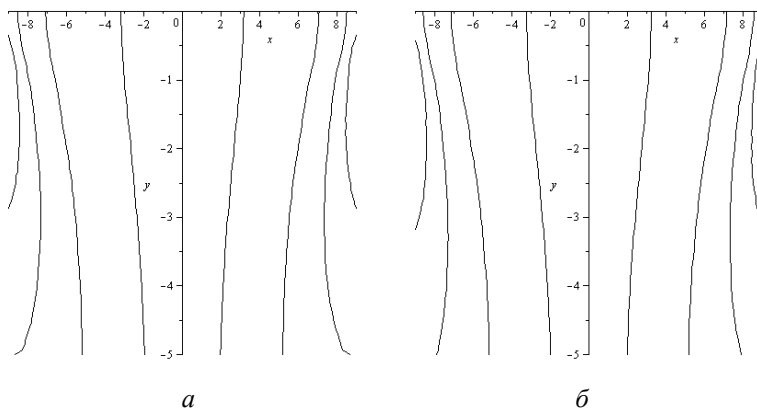


Рис. 4. Изолинии вертикального напряжения: при  $a$  —  $\beta = 0,044$  (глина),  $M = 1$ ;  $b$  —  $\beta = 0,094$  (песок),  $M = 1$

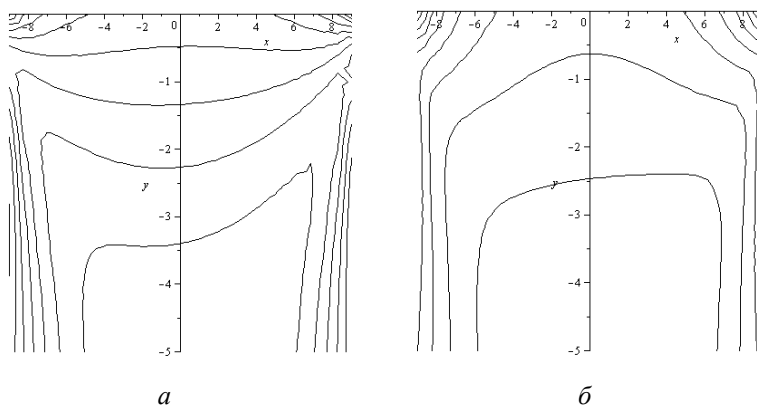


Рис. 5. Изолинии касательного напряжения: при  $a$  —  $\beta = 0,044$  (глина),  $M = 1$ ;  $b$  —  $\beta = 0,094$  (песок),  $M = 1$

Пусть на участке  $-l \leq t \leq l$  оси  $Ox$  задана наклонная нагрузка вида (1) (рис. 6). Угол наклона  $\alpha$  между нагрузкой и положительным направлением оси  $Ox$  при  $p > 0$  и  $q$  произвольного знака, будем полагать равным

$$\alpha = -\arctg \frac{p}{q}, \text{ если } q < 0,$$

$$\alpha = \pi - \arctg \frac{p}{q}, \text{ если } q \geq 0.$$

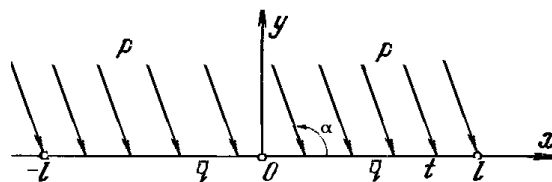


Рис. 6. Расчетная схема задачи



Получим компоненты напряжения для горизонтального штампа, к основанию которого на участке  $-l \leq t \leq l$  приложена нагрузка указанного вида.

Согласно [1, с. 414, 416], функция напряжения в этом случае имеет вид

$$\Phi_2(z) = \frac{-q + ip}{2\pi} X(z), \quad (11)$$

где  $X(z)$  выражается формулой (4).

Прямые вычисления для функции напряжения  $\Phi_2(z)$  дают

$$\begin{aligned} \Phi_2(z) &= -\frac{e^{\beta(\theta_2 - \theta_1)}}{2\pi\sqrt{\rho_1\rho_2}} \left[ (qw_1 + pw_2) + i(qw_2 - pw_1) \right], \\ \overline{\Phi_2}(z) &= -\frac{e^{-\beta(\theta_2 - \theta_1)}}{2\pi\sqrt{\rho_1\rho_2}} \left[ (q\bar{w}_1 - p\bar{w}_2) + i(q\bar{w}_2 + p\bar{w}_1) \right], \\ \Phi'_2(z) &= \frac{e^{\beta(\theta_2 - \theta_1)}}{2\pi(\rho_1\rho_2)\sqrt{\rho_1\rho_2}} \left[ (pN - qR) + i(pR + qN) \right]. \end{aligned}$$

Тогда выражения (2) и (3) примут вид

$$\begin{aligned} \sigma_x + \sigma_y &= -\frac{2e^{\beta(\theta_2 - \theta_1)}}{\pi\sqrt{\rho_1\rho_2}} [qw_1 + pw_2], \\ \sigma_y - \sigma_x + 2i\tau_{xy} &= 2 \left\{ \frac{ye^{\beta(\theta_2 - \theta_1)}}{\pi\rho_1\rho_2\sqrt{\rho_1\rho_2}} \left[ (pR + qN) - i(pN - qR) \right] + \right. \\ &\quad + \frac{e^{\beta(\theta_2 - \theta_1)}}{2\pi\sqrt{\rho_1\rho_2}} \left[ (qw_1 + pw_2) + i(qw_2 - pw_1) \right] + \\ &\quad \left. + \frac{e^{-\beta(\theta_2 - \theta_1)}}{2\pi\sqrt{\rho_1\rho_2}} \left[ (q\bar{w}_1 - p\bar{w}_2) + i(p\bar{w}_1 + q\bar{w}_2) \right] \right\}. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\sigma_x = -\frac{ye^{\beta(\theta_2 - \theta_1)}}{\pi\rho_1\rho_2\sqrt{\rho_1\rho_2}} (pR + qN) - \frac{e^{-\beta(\theta_2 - \theta_1)}}{2\pi\sqrt{\rho_1\rho_2}} (q\bar{w}_1 - p\bar{w}_2) - \frac{3e^{\beta(\theta_2 - \theta_1)}}{2\pi\sqrt{\rho_1\rho_2}} (pw_2 + qw_1), \quad (12)$$

$$\sigma_y = \frac{ye^{\beta(\theta_2 - \theta_1)}}{\pi\rho_1\rho_2\sqrt{\rho_1\rho_2}} (pR + qN) + \frac{e^{-\beta(\theta_2 - \theta_1)}}{2\pi\sqrt{\rho_1\rho_2}} (q\bar{w}_1 - p\bar{w}_2) - \frac{e^{\beta(\theta_2 - \theta_1)}}{2\pi\sqrt{\rho_1\rho_2}} (pw_2 + qw_1), \quad (13)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{ye^{\beta(\theta_2 - \theta_1)}}{\pi\rho_1\rho_2\sqrt{\rho_1\rho_2}} (pN - qR) + \frac{e^{\beta(\theta_2 - \theta_1)}}{2\pi\sqrt{\rho_1\rho_2}} (qw_2 - pw_1) + \frac{e^{-\beta(\theta_2 - \theta_1)}}{2\pi\sqrt{\rho_1\rho_2}} (p\bar{w}_1 + q\bar{w}_2). \quad (14)$$

На рис. 7—15 приведены изолинии горизонтальных, вертикальных и касательных напряжений, построенные на основании формул (12)—(14) при  $l = 10$  и конкретных значениях параметров.

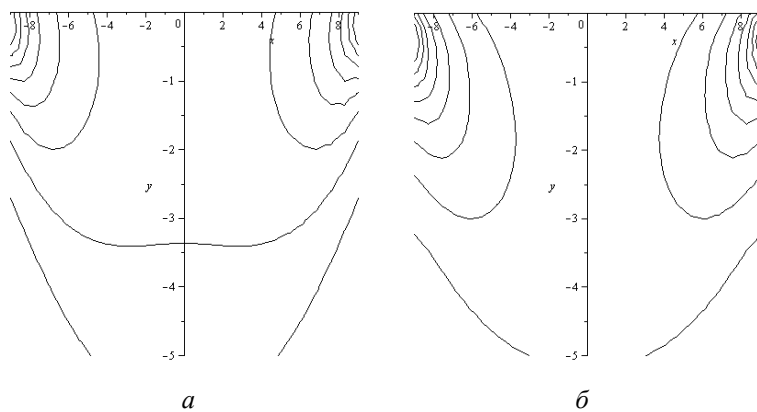


Рис. 7. Изолинии горизонтального напряжения: при  $a$  —  $\beta = 0,044$  (глина),  $p = 1$ ,  $q = 0$ ;  $b$  —  $\beta = 0,094$  (песок),  $p = 1$ ,  $q = 0$

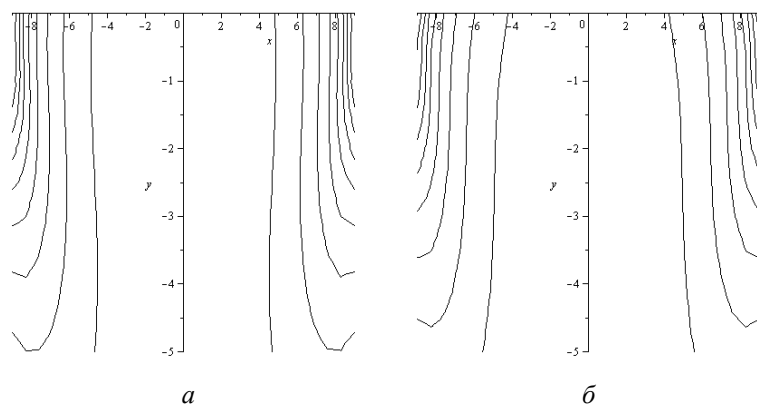


Рис. 8. Изолинии вертикального напряжения: при  $a$  —  $\beta = 0,044$  (глина),  $p = 1$ ,  $q = 0$ ;  $b$  —  $\beta = 0,094$  (песок),  $p = 1$ ,  $q = 0$

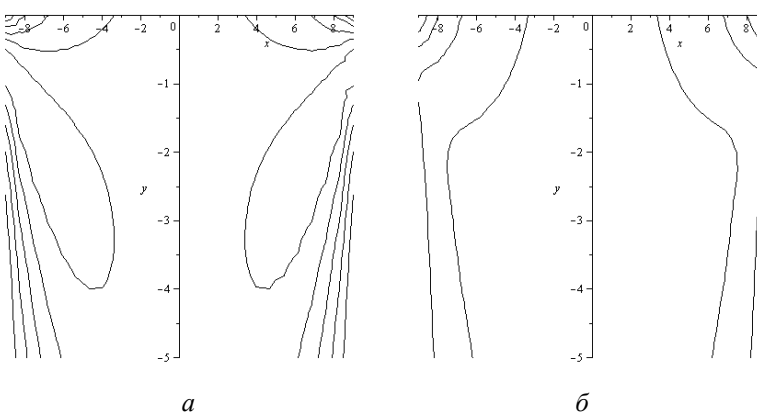


Рис. 9. Изолинии касательного напряжения: при  $a$  —  $\beta = 0,044$  (глина),  $p = 1$ ,  $q = 0$ ;  $b$  —  $\beta = 0,094$  (песок),  $p = 1$ ,  $q = 0$

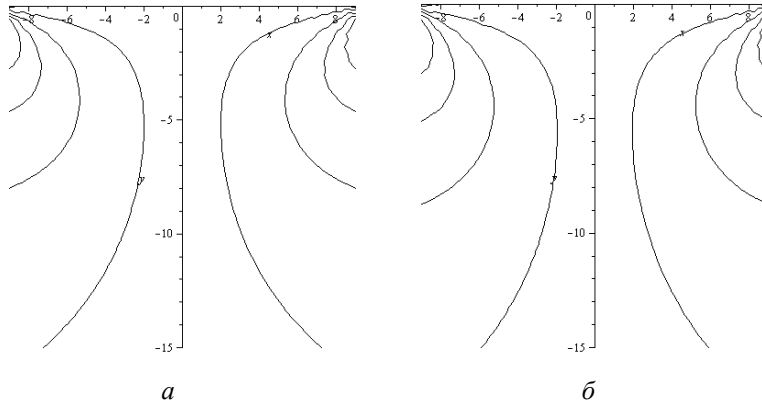


Рис. 10. Изолинии горизонтального напряжения: при  $a$  —  $\beta = 0,044$  (глина),  $p = 0$ ,  $q = 1$ ;  $б$  —  $\beta = 0,094$  (песок),  $p = 0$ ,  $q = 1$

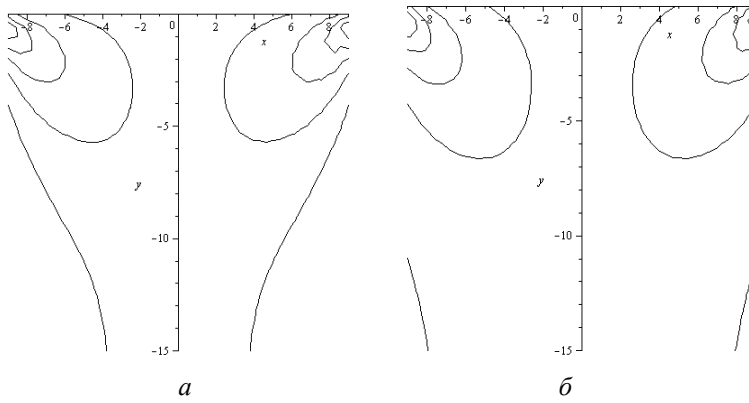


Рис. 11. Изолинии вертикального напряжения: при  $a$  —  $\beta = 0,044$  (глина),  $p = 0$ ,  $q = 1$ ;  $б$  —  $\beta = 0,094$  (песок),  $p = 0$ ,  $q = 1$

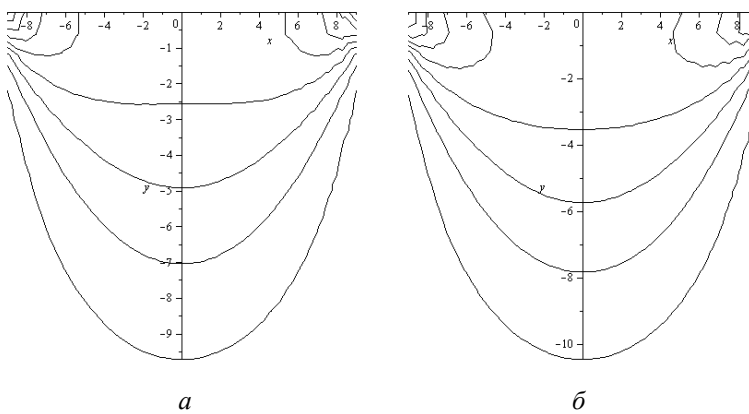


Рис. 12. Изолинии касательного напряжения: при  $a$  —  $\beta = 0,044$  (глина),  $p = 0$ ,  $q = 1$ ;  $б$  —  $\beta = 0,094$  (песок),  $p = 0$ ,  $q = 1$

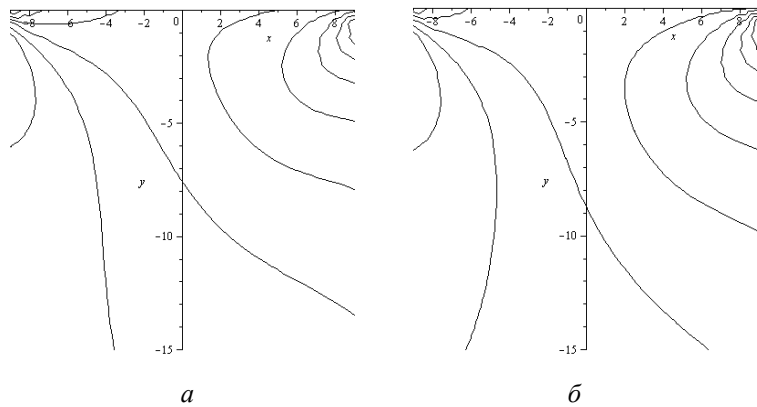


Рис. 13. Изолинии горизонтального напряжения: при  $a$  —  $\beta = 0,044$  (глина),  $p = 1, q = 1$ ;  $б$  —  $\beta = 0,094$  (песок),  $p = 1, q = 1$

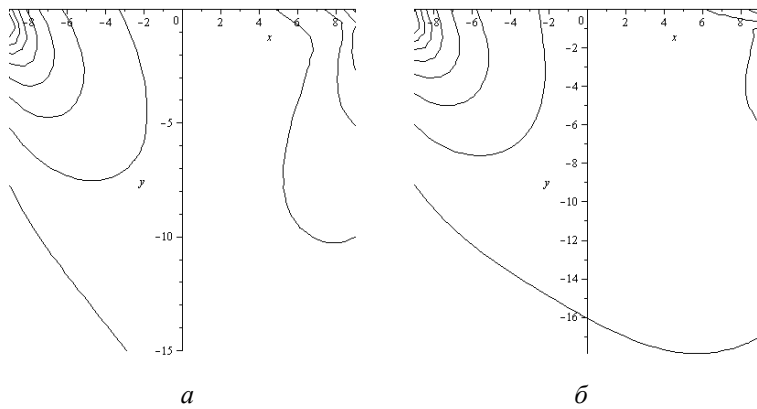


Рис. 14. Изолинии вертикального напряжения: при  $a$  —  $\beta = 0,044$  (глина),  $p = 1, q = 1$ ;  $б$  —  $\beta = 0,094$  (песок),  $p = 1, q = 1$

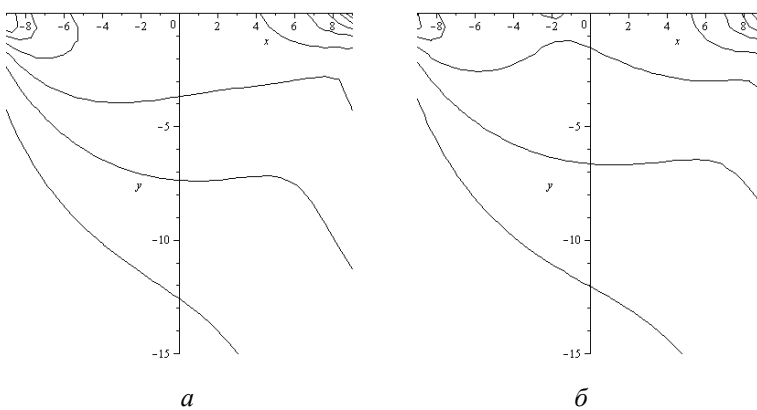


Рис. 15. Изолинии касательного напряжения: при  $a$  —  $\beta = 0,044$  (глина),  $p = 1, q = 1$ ;  $б$  —  $\beta = 0,094$  (песок),  $p = 1, q = 1$

Ясно, что для решения поставленной задачи необходимо сложить компоненты напряжения (7')—(9') и (12)—(14) соответственно. На рис. 16—24 приведены изолинии горизонтальных, вертикальных и касательных напряжений, построенные на основании формул, полученных в результате сложения при  $l=10$  и конкретных значениях параметров.

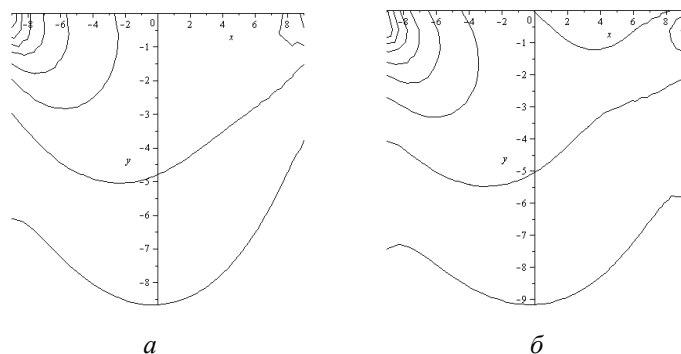


Рис. 16. Изолинии горизонтального напряжения: при  $a$  —  $\beta = 0,044$  (глина),  $p=1$ ,  $q=0$ ,  $M=1$ ;  $b$  —  $\beta = 0,094$  (песок),  $p=1$ ,  $q=0$ ,  $M=1$

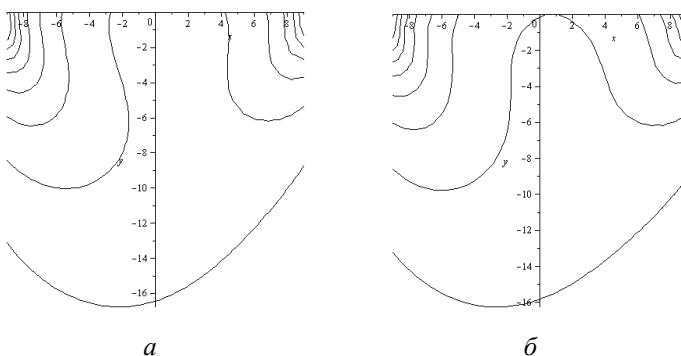


Рис. 17. Изолинии вертикального напряжения: при  $a$  —  $\beta = 0,044$  (глина),  $p=1$ ,  $q=0$ ,  $M=1$ ;  $b$  —  $\beta = 0,094$  (песок),  $p=1$ ,  $q=0$ ,  $M=1$

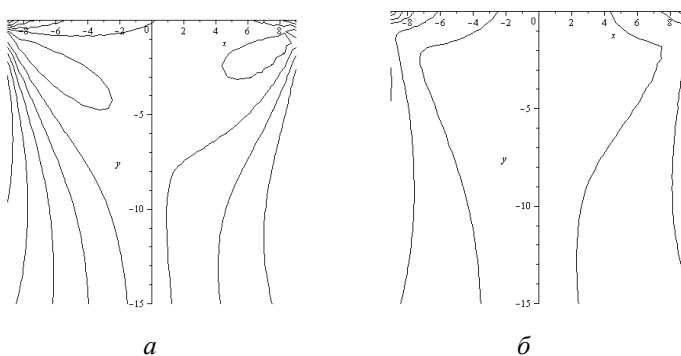


Рис. 18. Изолинии касательного напряжения: при  $a$  —  $\beta = 0,044$  (глина),  $p=1$ ,  $q=0$ ,  $M=1$ ;  $b$  —  $\beta = 0,094$  (песок),  $p=1$ ,  $q=0$ ,  $M=1$

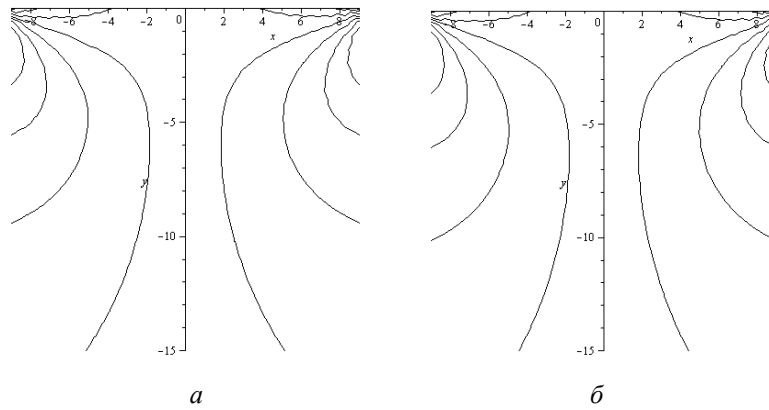


Рис. 19. Изолинии горизонтального напряжения: при  $a$  —  $\beta = 0,044$  (глина),  $p=0$ ,  $q=1$ ,  $M=1$ ;  $б$  —  $\beta = 0,094$  (песок),  $p=0$ ,  $q=1$ ,  $M=1$

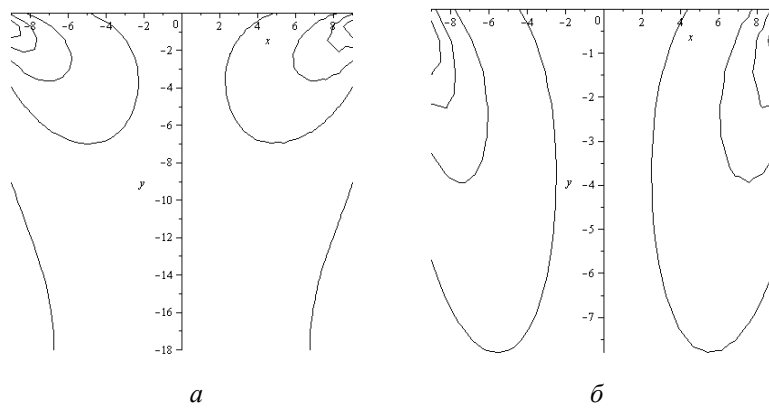


Рис. 20. Изолинии вертикального напряжения: при  $a$  —  $\beta = 0,044$  (глина),  $p=0$ ,  $q=1$ ,  $M=1$ ;  $б$  —  $\beta = 0,094$  (песок),  $p=0$ ,  $q=1$ ,  $M=1$

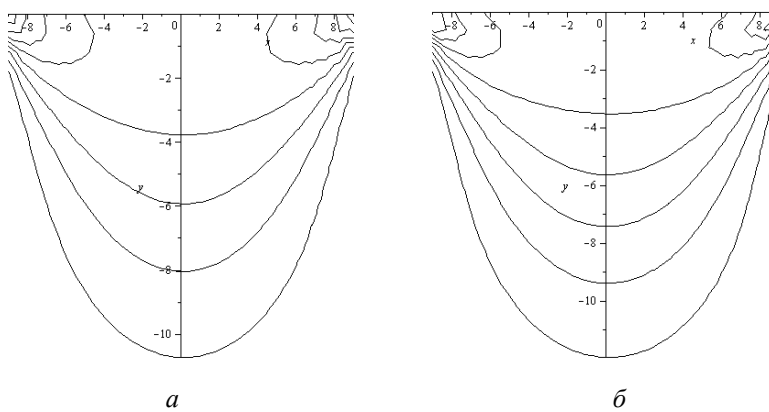


Рис. 21. Изолинии касательного напряжения: при  $a$  —  $\beta = 0,044$  (глина),  $p=0$ ,  $q=1$ ,  $M=1$ ;  $б$  —  $\beta = 0,094$  (песок),  $p=0$ ,  $q=1$ ,  $M=1$

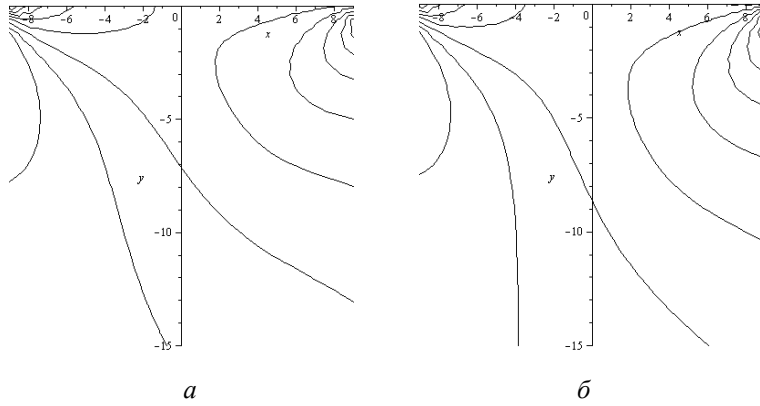


Рис. 22. Изолинии горизонтального напряжения: при  $a$  —  $\beta = 0,044$  (глина),  $p = 1, q = 1, M = 1$ ;  $\delta$  —  $\beta = 0,094$  (песок),  $p = 1, q = 1, M = 1$

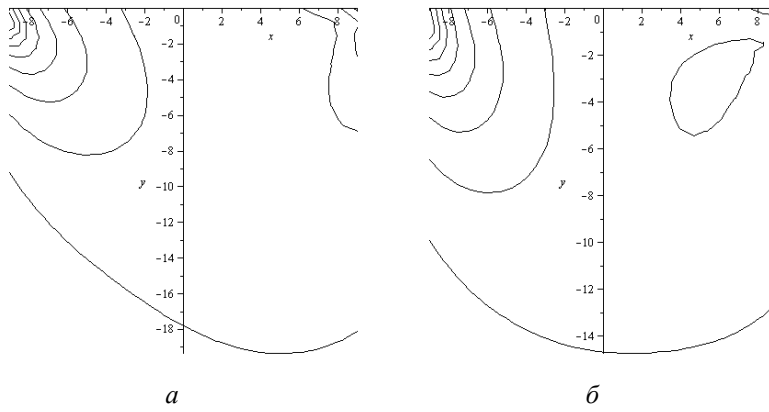


Рис. 23. Изолинии вертикального напряжения: при  $a$  —  $\beta = 0,044$  (глина),  $p = 1, q = 1, M = 1$ ;  $\delta$  —  $\beta = 0,094$  (песок),  $p = 1, q = 1, M = 1$

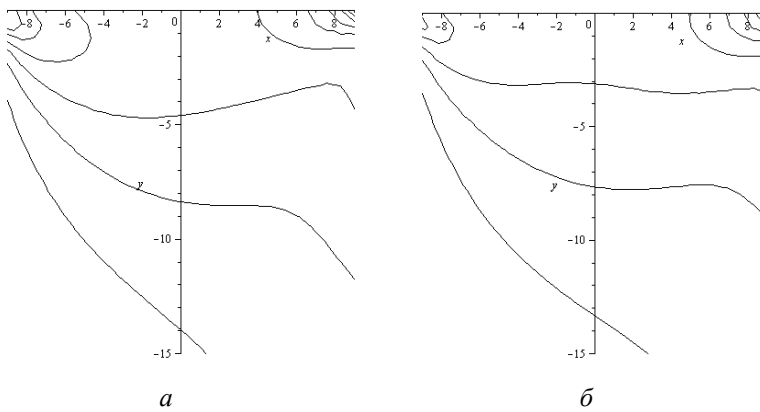


Рис. 24. Изолинии касательного напряжения: при  $a$  —  $\beta = 0,044$  (глина),  $p = 1, q = 1, M = 1$ ;  $\delta$  —  $\beta = 0,094$  (песок),  $p = 1, q = 1, M = 1$

Теперь, исходя из полученных формул, получим формулы давления и касательного напряжения для точек  $t$  под штампом.

Полагая в формуле (6)

$$y = 0, \quad x = t, \quad \theta_1 = \pi, \quad \theta_2 = 0, \quad \rho_1 = |l - t|, \quad \rho_2 = |l + t|, \quad (15)$$

получим формулу для давления, действующего на тело под штампом, т. е.

$$P(t) = -\frac{2\mu\varepsilon}{(\aleph + 1)\sqrt{l^2 - t^2}} \left[ t \cos\left(\beta \ln \left| \frac{l+t}{l-t} \right| \right) + 2\beta l \sin\left(\beta \ln \left| \frac{l+t}{l-t} \right| \right) \right] (e^{\pi\beta} + e^{-\pi\beta}).$$

Так как, согласно (5),

$$e^{\pi\beta} = \sqrt{\aleph}, \quad e^{-\pi\beta} = \frac{1}{\sqrt{\aleph}},$$

то для давления имеем

$$P(t) = -\frac{2\mu\varepsilon}{\sqrt{\aleph}\sqrt{l^2 - t^2}} \left[ t \cos\left(\beta \ln \left| \frac{l+t}{l-t} \right| \right) + 2\beta l \sin\left(\beta \ln \left| \frac{l+t}{l-t} \right| \right) \right]. \quad (16)$$

Аналогично, при тех же значениях точек отрезка границы  $L$  для касательного напряжения из формулы (9) получаем

$$T(t) = -\frac{2\mu\varepsilon}{\sqrt{\aleph}\sqrt{l^2 - t^2}} \left[ t \sin\left(\beta \ln \left| \frac{l+t}{l-t} \right| \right) - 2\beta l \cos\left(\beta \ln \left| \frac{l+t}{l-t} \right| \right) \right]. \quad (17)$$

Отсюда, учитывая, что  $-l \leq t \leq l$ , из (16) и (17) имеем

$$P(t) = -\frac{2\mu\varepsilon}{\sqrt{\aleph}\sqrt{l^2 - t^2}} \left[ t \cos\left(\beta \ln \frac{l+t}{l-t}\right) + 2\beta l \sin\left(\beta \ln \frac{l+t}{l-t}\right) \right], \quad (16')$$

$$T(t) = -\frac{2\mu\varepsilon}{\sqrt{\aleph}\sqrt{l^2 - t^2}} \left[ t \sin\left(\beta \ln \frac{l+t}{l-t}\right) - 2\beta l \cos\left(\beta \ln \frac{l+t}{l-t}\right) \right]. \quad (17')$$

Формулы (16') и (17') дают решение задачи о штампе с прямолинейным наклонным основанием при заданном угле  $\varepsilon$  в случае равенства нулю равнодействующей внешних сил, приложенных к штампу. Используя (10), перепишем формулы (16') и (17') в виде

$$P(t) = -\frac{M}{\pi(1 + 4\beta^2)l^2\sqrt{l^2 - t^2}} \frac{\aleph + 1}{\sqrt{\aleph}} \left[ t \cos\left(\beta \ln \frac{l+t}{l-t}\right) + 2\beta l \sin\left(\beta \ln \frac{l+t}{l-t}\right) \right], \quad (16'')$$

$$T(t) = -\frac{M}{\pi(1 + 4\beta^2)l^2\sqrt{l^2 - t^2}} \frac{\aleph + 1}{\sqrt{\aleph}} \left[ t \sin\left(\beta \ln \frac{l+t}{l-t}\right) - 2\beta l \cos\left(\beta \ln \frac{l+t}{l-t}\right) \right]. \quad (17'')$$

Формулы (16'') и (17'') дают решение той же задачи при заданном значении  $M$  пары внешних сил, действующих на штамп.



Проводя аналогичные вычисления при значениях (15), из формул (13), (14) получим

$$P(t) = \frac{1}{2\pi\sqrt{l^2 - t^2}} \frac{\aleph + 1}{\sqrt{\aleph}} \left[ p \cos\left(\beta \ln \frac{l+t}{l-t}\right) - q \sin\left(\beta \ln \frac{l+t}{l-t}\right) \right], \quad (18)$$

$$T(t) = \frac{P}{2\pi\sqrt{l^2 - t^2}} \frac{\aleph + 1}{\sqrt{\aleph}} \left[ p \sin\left(\beta \ln \frac{l+t}{l-t}\right) + q \cos\left(\beta \ln \frac{l+t}{l-t}\right) \right]. \quad (19)$$

Складывая формулы (16') с (18), а (17') с (19), получим формулы давления и касательного напряжения, действующего под штампом. На рис. 25 приведены эпюры давления, построенные на основании формул, полученных в результате сложения для песчаного грунта ( $\beta = 0,094$ ) при  $l = 10$  и конкретных значениях нагрузки и момента.

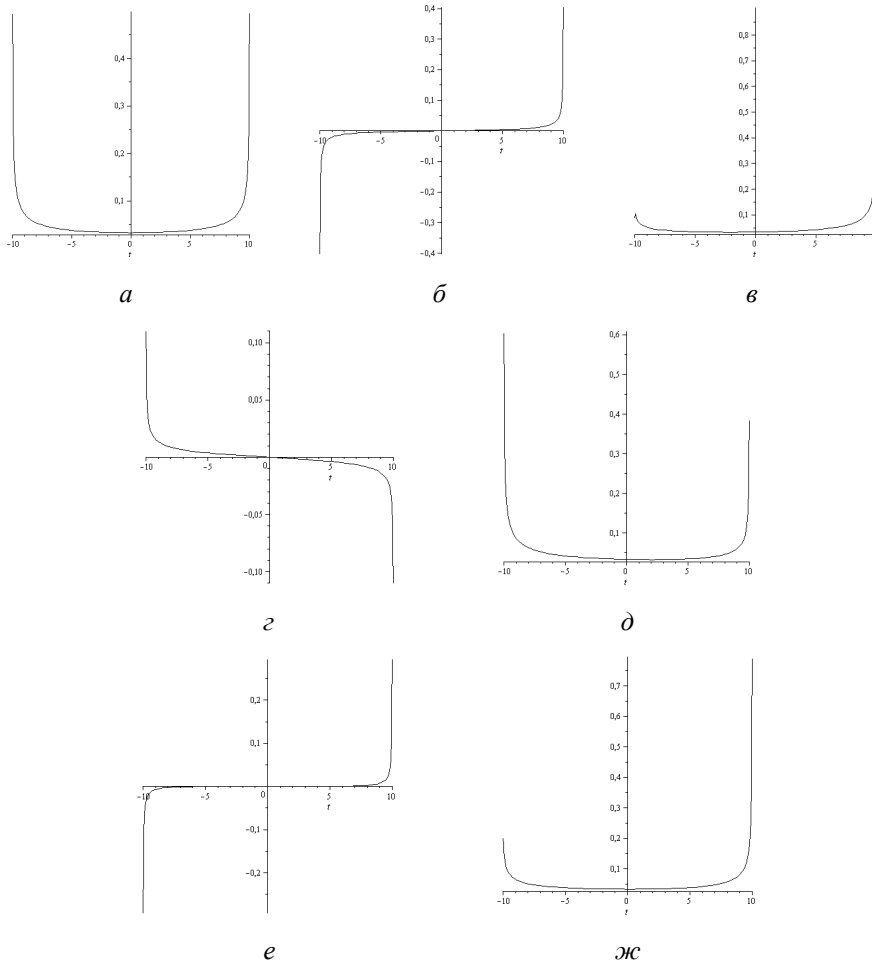


Рис. 25. Эпюры давления: при *a* —  $p=1, q=0, M=0$ ; *б* —  $p=0, q=1, M=0$ ; *в* —  $p=1, q=1, M=0$ ; *г* —  $p=0, q=0, M=1$ ; *д* —  $p=1, q=0, M=1$ ; *е* —  $p=0, q=1, M=1$ ; *ж* —  $p=1, q=1, M=1$

Полагая в (18) и (19)  $q = 0$ , имеем формулы давления и касательного напряжения от вертикальной нагрузки интенсивности  $p$ , т. е.

$$P(t) = \frac{p}{2\pi\sqrt{l^2 - t^2}} \frac{\aleph + 1}{\sqrt{\aleph}} \cos\left(\beta \ln \frac{l+t}{l-t}\right), \quad (18')$$

$$T(t) = \frac{p}{2\pi\sqrt{l^2 - t^2}} \frac{\aleph + 1}{\sqrt{\aleph}} \sin\left(\beta \ln \frac{l+t}{l-t}\right). \quad (19')$$

Формулы (18') и (19') получены Н. И. Мусхелишвили [1] методами теории функций комплексного переменного и В. М. Абрамовым [3] методом интегральных преобразований и дают решение классической задачи о штампе с прямолинейным горизонтальным основанием.

Отметим одно важное свойство функции давления  $P_s(t)$ , полученной сложением функций (16') и (18'). Покажем, что при любых значениях  $p > 0$  и  $M$  уравнение

$$P_s(t) = 0 \quad (20)$$

имеет не более одного корня.

Действительно, (16'), являясь нечетной функцией, монотонно убывает на отрезке  $-l \leq t \leq l$  при  $M > 0$ , оставаясь положительной на интервале  $-l \leq t < 0$  и отрицательной на интервале  $0 < t \leq l$ , и монотонно возрастает на рассматриваемом отрезке при  $M < 0$ , принимая отрицательные значения на интервале  $-l \leq t < 0$  и положительные значения на интервале  $0 < t \leq l$ . При  $t = 0$  функция (16') принимает нулевое значение.

Функция (18') является четной положительной функцией на отрезке  $-l \leq t \leq l$ , минимальное значение которой равно  $\frac{p(\aleph + 1)}{2\pi l \sqrt{\aleph}} > 0$  при  $t = 0$ .

Тогда из приведенных выше рассуждений следует, что при  $M > 0$  корень уравнения (20) может находиться лишь на интервале  $0 < t \leq l$ ,

при  $M < 0$  — лишь на интервале  $-l \leq t < 0$ .

Нетрудно показать, что этот корень удовлетворяет уравнению

$$t + 2\beta l \operatorname{tg}\left(\beta \ln \frac{l+t}{l-t}\right) - \frac{p(1 + 4\beta^2)l^2}{2M} = 0 \quad (21)$$

при  $t \neq \pm l \operatorname{th} \frac{\pi^2}{2 \ln \aleph}$ ,  $M \neq 0$ , решение которого можно получить численно с достаточной для практики точностью. Например, приняв,  $\beta = 0,094$ ,  $l = 10$  при  $p = 1$  и  $M = 10$  из уравнения (21) получим  $t \approx 4,983$ .

Заметим, что при перемене знака момента  $M$ , корень уравнения (21) меняет знак на противоположный, сохраняя свое численное значение.

---

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мухелишвили Н. И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости. М. : Наука, 1966.
2. Справочник проектировщика. Основания, фундаменты и подземные сооружения / М. И. Горбунов-Посадов, В. А. Ильичев, В. И. Крутов и др. ; под общ. ред. Е. А. Сорочана и Ю. Г. Трофименкова. М. : Стройиздат, 1985.
3. *Абрамов В. М.* Проблема контакта упругой полуплоскости с абсолютно жестким фундаментом при учете сил трения // ДАН СССР. 1937. Т. 17. № 4. С. 173—178.
1. *Muskhelishvili N. I.* Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti. M. : Nauka, 1966.
2. Spravochnik projektirovshchika. Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya / M. I. Gorbunov-Posadov, V. A. Il'ichev, V. I. Krutov i dr. ; pod obshch. red. E. A. Sorochana i Yu. G. Trofimenkova. M. : Stroyizdat, 1985.
3. *Abramov V. M.* Problema kontakta uprugoy poluploskosti s absolyutno zhestkim fundamentom pri uchete sil treniya // DAN SSSR. 1937. T. 17. № 4. S. 173—178.

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

*Поступила в редакцию  
в декабре 2013 г.*

*Ссылка для цитирования:*

*Богомолов А. Н., Ушаков А. Н., Богомолова О. А.* Напряженное состояние упругой полуплоскости в случае наклонной нагрузки, приложенной к штампу, при условии его полного прилипания к прямолинейному наклонному основанию // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 27—43.

УДК 624.042.8

**И. В. Денисов, В. Л. Харланов**

## СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ ЗДАНИЙ

Описаны основные системы сейсмоизоляции зданий и сооружений, применяемые в современном строительстве.

**Ключевые слова:** сейсмоизоляторы, сейсмоизолирующий узел, кинематические опоры, железобетонный механизм сейсмоизоляции на сфероидах.

The authors describe main seismic isolation systems for buildings and structures used in modern construction.

**Key words:** seismic isolation, unit of seismic isolation, kinematic fundaments, ferro-concrete seismic isolation system by spherical bearings.

Системы сейсмоизоляции делятся на 4 основные группы: сейсмоизоляция кинематическими опорами, сейсмоизоляция с вязким затуханием, сейсмоизоляция сухим трением, сейсмоизоляция с гистерезисным затуханием.

Сейсмоизоляция кинематическими опорами подразделяется на 7 видов: кинематические опоры Ю. Д. Черепинского; сейсмоизолирующий узел; гравитационно-упругая система сейсмоизоляции В. В. Назипа; железобетонный механизм сейсмоизоляции на сфероидах; фундаменты на тяжах; сейсмоизоляция столбчато-ленточным фундаментом, возведенным по технологии ТИСЭ.

Кинематические опоры Ю. Д. Черепинского [1] используют в строительстве жилых многоэтажных зданий с монолитным безригельным каркасом. Общим для данного типа фундаментов является способность ограничивать интенсивность сейсмической нагрузки, передаваемой с основания на здание, главным образом, величиной сил трения. Геометрические формы (рис. 1) и параметры фундамента зависят от места расположения и назначения в составе здания, а также от величины, передаваемой на фундамент вертикальной нагрузки, прочности используемого материала и интенсивности сейсмического воздействия. Чем больше величина нагрузки на фундамент и сейсмичность района, тем больше геометрические размеры, причем больше всего это сказывается на размере радиуса фундамента. Конструктивное решение сейсмозащиты с использованием КФ образует сейсмоизолирующее основание (систему) под зданием и определяет его динамические свойства. При наличии подвала в здании поддерживающие конструкции выполняют в виде ленточного ростверка.

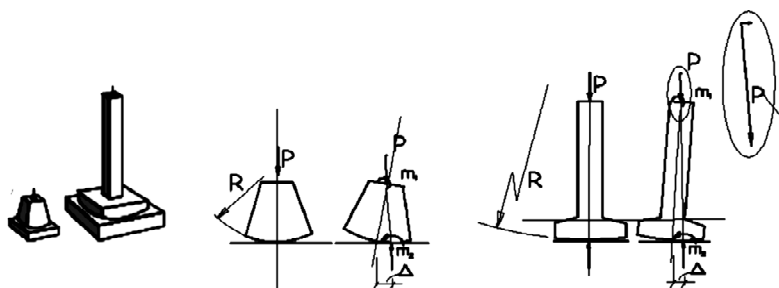


Рис. 1. Различные геометрические формы фундаментов Черепинского

Сейсмоизолирующий узел [2] состоит из элементов трения скольжения, которые обеспечивают смещение (проскальзывание) строительного объекта по отношению к своему фундаменту. Узел должен состоять из двух частей 3, свободно смещаемых друг относительно друга в горизонтальной плоскости, между которыми должны располагаться элементы трения скольжения 6 (рис. 2). Одновременно с этим, части нового узла должны быть амортизаторами.

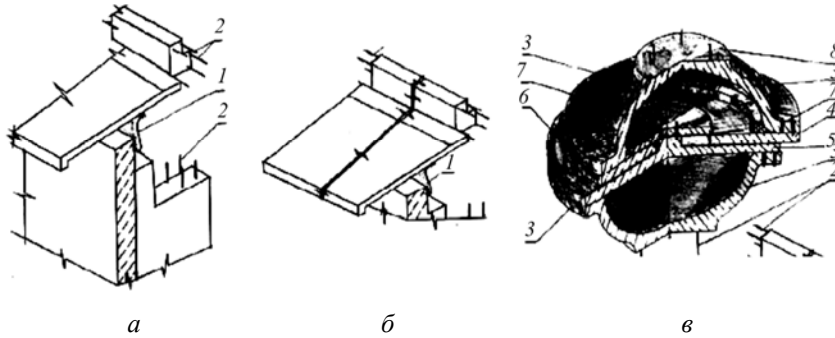


Рис. 2. Практический вариант комплексного решения системы сейсмозащиты со скользящим поясом (конструкции инженера Н. В. Мартынова): *а* — элементы фундамента или этажа установки сейсмоизолирующего узла; *б* — ригельная балка подвала или балка этажа установки сейсмоизолирующего узла; *в* — сейсмоизолирующий узел: 1 — гибкая тепло-изоляционная защита фундамента здания или сооружения; 2 — анкерующие стержни конструкций и стержни крепления сейсмоизолирующего узла; 3 — опорные оболочки сейсмоизолирующего узла; 4 — двутавровая и 5 — кольцевая опорные пластины; 6 — фрикционные элементы; 7 — обечайка; 8 — опорная площадка для установки ригельных балок

Гравитационно-упругая система сейсмоизоляции В. В. Назина [3] представлена на рис. 3.

Железобетонный механизм сейсмоизоляции на сфероидах показан на рис. 4 [1].

Сейсмоизолирующие фундаменты на тяжах [4] в Мексике и Японии представлены на рис. 5. Расчетная схема этих фундаментов дана на рис. 6.

В США широко применяют изоляторы Золтана [2], состоящие из стальных и резиновых прокладок. Ставят их в узлах опирания балок и колонн. Работают изоляторы как сейсмические предохранители. Обладая упругими свойствами, они гасят колебания, возникающие при землетрясении. Стальные элементы не касаются друг друга, а усилия передаются через резиновые блоки и поглощаются за счет упругого сжатия резины.

Механизмом сейсмоизоляции является столбчато-ленточный фундамент, возведенный по технологии ТИСЭ. Отличия — вертикальное армирование; вокруг верхней части столбов заложена смесь песка с керамзитом или шлаком (рис. 7). В качестве вертикальной арматуры фундаментного столба используется прутки диаметром 20 мм, который проходит через ростверк. По завершению строительства сверху устанавливается гайка, которая затягивается тарированным ключом. Тем самым в зоне стыка столба с ростверком создается «упругий» шарнир.

Сейсмоизоляция с вязким затуханием подразделяется на 3 вида: вибро-сейсм с демпфером вязкого трения [3]; резинометаллические опоры; сейсмоизолирующий тарельчатый фундамент.

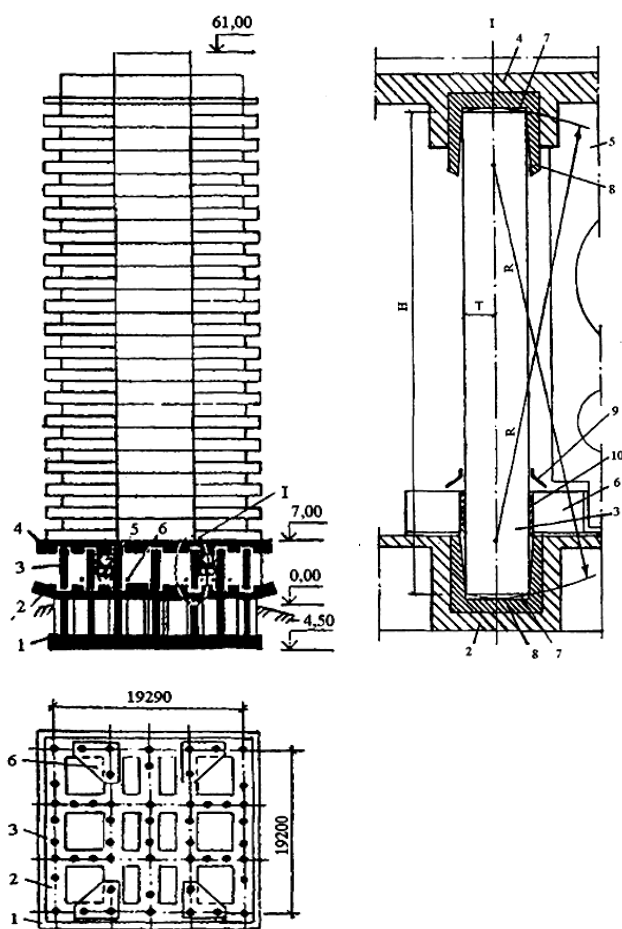


Рис. 3. Гравитационно-упругая система сейсмоизоляции (ГУСС): 1 — фундамент; 2 — нижний пояс системы; 3 — сферическая стойка; 4 — верхний пояс системы; 5 — тормозная связь; 6 — груз сухого трения; 7 — упругая прокладка; 8 — стакан; 9 — зонт; 10 — поролоновая прокладка

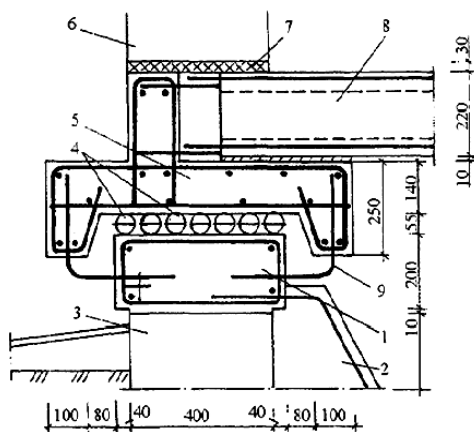


Рис. 4. Железобетонный механизм сейсмоизоляции на сфероидах: 1 — железобетонный пояс фундамента; 2 — контрфорс; 3 — фундамент; 4 — цементно-песчаный сфероид; 5 — железобетонный пояс стены; 6 — стена; 7 — упругая прокладка; 8 — перекрытие над подвалом; 9 — условная тормозная связь

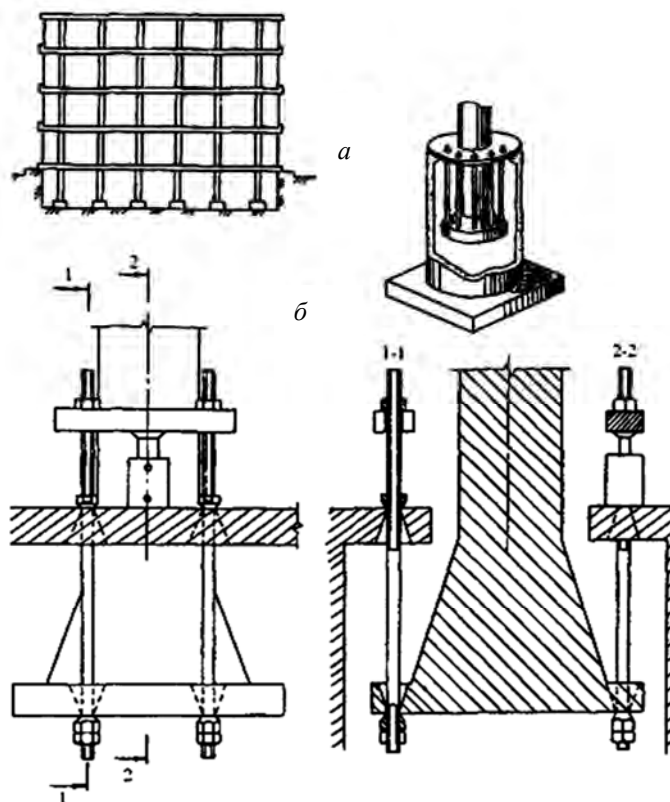


Рис. 5. Варианты конструкции фундаментов на тяжах: *а* — в Мексике; *б* — в Японии

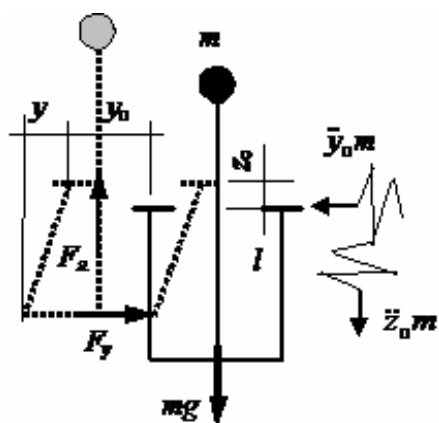


Рис. 6. Расчетная схема фундаментов на тяжах

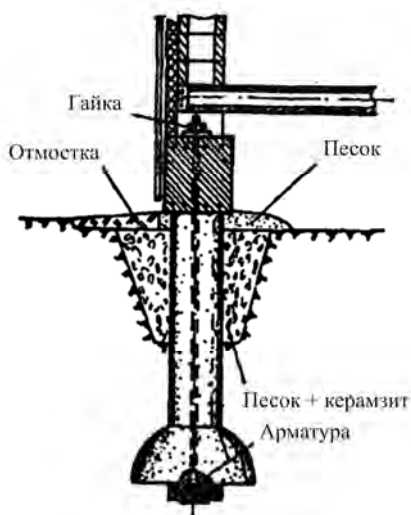


Рис. 7. Схема столбчато-ленчатого фундамента [2]

Демпфер состоит из корпуса и поршня, имеющих одинаковые ответные прямоугольные фланцы с четырьмя отверстиями, для крепления на любом объекте (рис. 8). Он устанавливается вертикально, демпфирует все относительные движения между корпусом и поршнем по всем степеням свободы и не несет статической нагрузки. Как правило, фланец корпуса крепится к неподвижному основанию, а фланец поршня — к оборудованию, которое необходимо защитить от динамических нагрузок.

Расчетная схема демпфера вязкого трения представлена на рис. 9.



Рис. 8. Общий вид высоковязкого демпфера

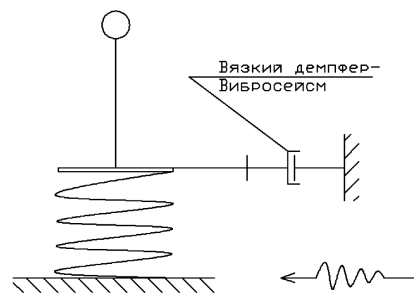


Рис. 9. Расчетная схема демпфера вязкого трения

Резинометаллические сейсмоизоляторы со свинцовым сердечником относят к группе сейсмоизолирующих устройств с гистерезисным затуханием [2]. Эффективность таких опорных частей обусловлена высокой диссипацией энергии свинцовым стержнем. Варианты резинометаллических опор, которые используются в разных странах, показаны на рис. 10.

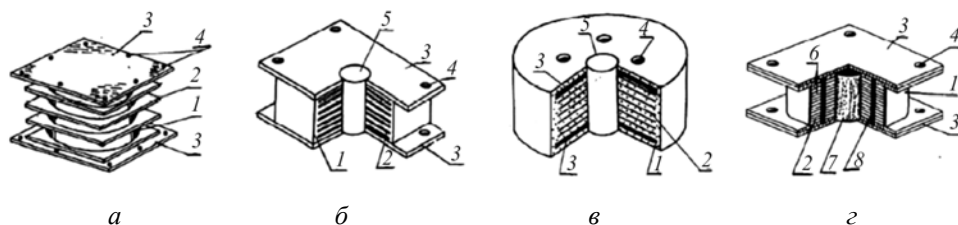


Рис. 10. Конструктивные схемы систем активной сейсмозащиты строительных объектов с помощью резинометаллических опор: а — вариант опоры, используемый во Франции (фирма GAPESC); б — вариант опоры, используемый в Новой Зеландии; в — вариант опоры, используемый в Японии; г — вариант опоры, используемый в США: 1 — слой каучука (резины); 2 — внутренний стальной лист; 3 — опорная стальная пластина; 4 — отверстия для крепления опор к конструкциям сооружения; 5 — свинцовый сердечник; 6 — слой тефлона (или фторопласта); 7 — центральный резиновый стержень; 8 — периферийный резиновый стержень

Сейсмоизолирующий тарельчатый фундамент (рис. 11, фиг.1, 2) состоит из нижней 1 и верхней 5 частей промежуточного элемента 2, выполненного в виде замкнутой камеры. Камера 2 заполняется шариками с вязкой масляной средой и выполнена с клапанами 4, 3, которые при землетрясении позволяют нижней части 1 фундамента с основанием хаотически колебаться, а верхняя часть 5 фундамента и жестко с ней связанное здание остаются в покое [2].



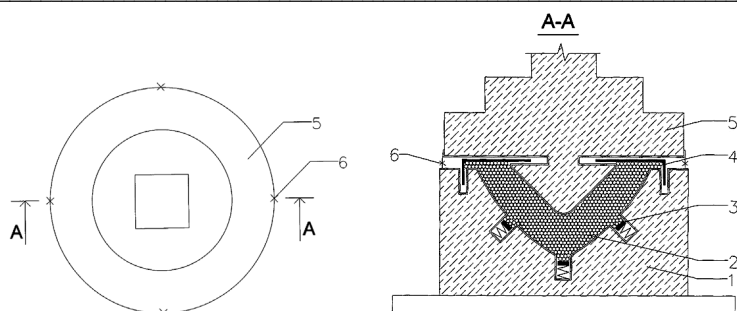


Рис. 11. Конструктивная схема тарельчатого фундамента

Сейсмоизоляция сухим трением подразделяется на 3 вида: кинематический пояс сейсмозащиты [4]; скользящий слой между основанием и фундаментом; сейсмоизоляция крупнозернистым песком.

Кинематический пояс (рис. 12) состоит из нижнего 1 и верхнего 2 железобетонных поясов, в которых образованы стаканы 3 с горизонтальными днищами. Стаканы снабжены закладными деталями 4 в форме швеллера.

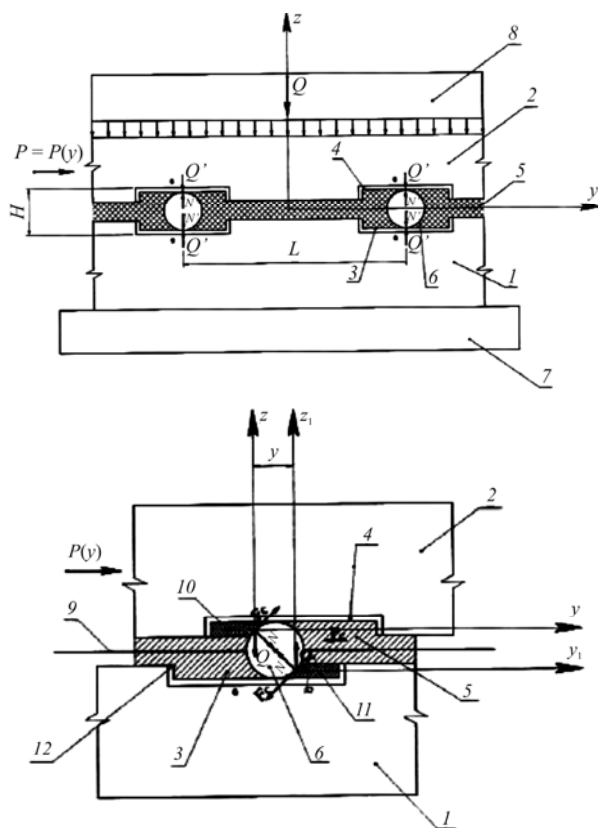


Рис. 12. Конструкция кинематического пояса: 1 — нижний пояс; 2 — верхний пояс; 3 — стакан; 4 — закладная деталь; 5 — изоляционный материал; 6 — подвижной элемент (шарообразной или цилиндрической формы); 7 — фундамент здания; 8 — надпорная часть здания; 9 — плоскость сдвигового разрушения изоляционного слоя; 10, 11 — активные зоны изоляционного материала; 12 — выступ

Скользкий слой между основанием и фундаментом рассмотрен в [2]. Пояс вводится между несущими конструкциями здания и фундаментом или непосредственно в фундамент. На рис. 13 представлен разрез пояса в горизонтальной плоскости. При слабых колебаниях ускорение основания передается зданию, как при жесткой связи с фундаментом. При увеличении ускорения основания силы трения преодолеваются и здание начинает проскальзывать относительно фундамента.

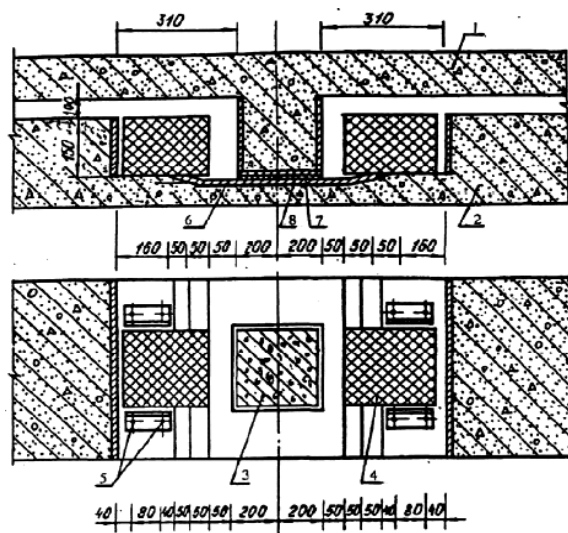
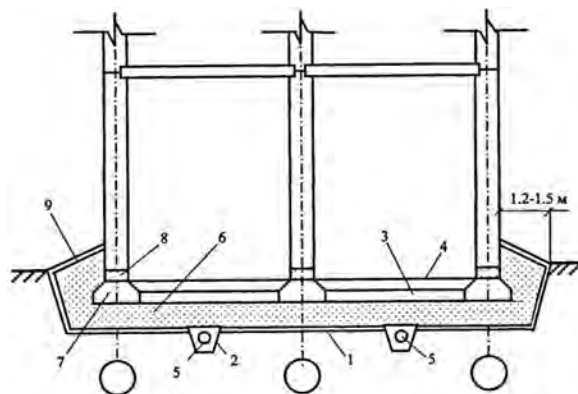


Рис. 13. Вариант конструктивного решения сейсмозащиты со скользящими опорами: 1 — железобетонный ростверк; 2 — жесткий ограничитель горизонтальных перемещений; 3 — опора ростверка; 4 — упругий ограничитель горизонтальных перемещений; 5 — анкерный болт; 6 — закладная деталь; 7 — пластина фторопласта-4; 8 — пластина из нержавеющей стали

Сейсмоизоляция крупнозернистым песком показана на рис. 14.

Рис. 14. Сейсмоизоляция крупнозернистым песком: 1 — дно котлована; 2 — углубления для дренажных труб; 3 — фундаментная плита; 4, 7 — фундаментные блоки; 5 — дренажные трубы; 6 — крупнозернистый песок; 8 — армопояс; 9 — гидроизоляция [2]



Способ сейсмоизоляции фундаментов сооружений включает: разработку котлована, поверхности дна которого придают уклон, равный 0,005...0,01; формирование на дне котлована дренажной системы, связанной с водоотводящей сетью; отсыпку подушки на часть глубины котлована; размещение на подушке фундаментных блоков и засыпку пазух котлована. Верхний уровень свойства гашения колебаний для используемого типа подушки устанавливается не ниже верхнего уровня прогнозируемой сейсмоопасности.

Достоинства и недостатки некоторых типов сейсмоизоляции представлены в табл.

| Тип сейсмоизоляции                                 | Достоинства                                                                                                                                                                                                                      | Недостатки                                                                                                                                          |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Сейсмоизоляция кинематическими опорами             | Простота изготовления, возможность изготовления непосредственно на строительной площадке; возможность многократного использования; простота конструкции, открытый доступ к системе                                               | Невосприимчивость данных систем к вертикальным колебаниям почвы; отсутствие точного метода расчета; высокая прямолинейность контактных поверхностей |
| Сейсмоизоляция с вязким (гистерезисным) затуханием | Эффективное демпфирование любых видов динамического воздействия (вибросейсм); надежная сейсмозащита; широкое применение (резинометаллические опоры); высокая прочность при сжатии, растяжении и кручении (тарельчатый фундамент) | Малая временная надежность; замена после землетрясения (резинометаллические опоры); высокая стоимость (демпфер вязкого трения)                      |
| Сейсмоизоляция сухим трением                       | Отличается простотой изготовления, низкой себестоимостью, устойчивостью к ветровым нагрузкам на здание                                                                                                                           | Отсутствие доступа к сейсмоизолирующей системе; отсутствие точного метода расчета                                                                   |

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черепинский Ю. Д. Сейсмоизоляция зданий. Строительство на кинематических фундаментах. М., 2009. С. 51—84.
2. Васюнкин А. Н., Бобров Ф. В. Экспериментальные исследования зданий на опорах в форме эллипсоидов вращения // Сейсмостойкое строительство. М. : Реф. инф. ЦИНИС. Сер. 14. 1976. Вып. 4. С. 20—24.
3. Поляков С. В., Килимник Л. Ш., Черкашин А. В. Современные методы сейсмозащиты зданий. М. : Стройиздат, 1989. 320 с.
4. Айзенберг Я. М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов. М. : Стройиздат, 1976. 232 с.

1. Cherepinskiy Yu. D. Seismoizolyatsiya zdaniy. Stroitel'stvo na kinematicheskikh fundamentakh. M., 2009. S. 51—84.
2. Vasyunkin A. N., Bobrov F. V. Eksperimental'nye issledovaniya zdaniy na oporakh v forme ellipsoidov vrashcheniya // Seysmostoykoe stroitel'stvo. M. : Ref. inf. TsINIS. Ser. 14. 1976. Vyp. 4. S. 20—24.
3. Polyakov S. V., Kilimnik L. Sh., Cherkashin A. V. Sovremennye metody seysmozashchity zdaniy. M. : Stroyizdat, 1989. 320 s.
4. Ayzenberg Ya. M. Sooruzheniya s vyklyuchayushchimisya svyaziyami dlya seysmicheskikh rayonov. M. : Stroyizdat, 1976. 232 s.

© Денисов И. В., Харланов В. Л., 2014

Поступила в редакцию  
в ноябре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Денисов И. В., Харланов В. Л. Современные системы сейсмоизоляции зданий // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр.-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 44—51.

УДК 624.072.2.042.8

**В. В. Егоров, П. Н. Григорьев**

## О ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ШПРЕНГЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Представлена механико-математическая модель поперечных колебаний предварительно напряженных комбинированных систем шпренгельного типа, учитывающая влияние геометрической и конструктивной нелинейности, а также многофакторный характер их нагружения и эксплуатации. Приведены данные численного анализа, свидетельствующие о том, что в отличие от стержневых конструкций комбинированные обладают особыми свойствами: на частоту их собственных колебаний, при периодическом отключении затяжек, оказывают влияние и амплитуды свободных колебаний, и усилия предварительного напряжения затяжек.

**Ключевые слова:** предварительно напряженные комбинированные системы шпренгельного типа, конструктивная нелинейность, периодическое отключение затяжек, внос затяжек, форма затяжек.

Presented is the mechanical and mathematical model of lateral vibrations of prestressed combined systems of strut type which takes into account the influence of geometrical and constructive nonlinearity, as well as multiple-factor nature of their loading and operation. The authors provide the data of the numerical analysis, which prove that unlike frames structures combined ones possess special characteristics: amplitude of free oscillations and efforts of prestress of binders have an influence on the frequency of their own fluctuations with periodic shutdown of binders.

**Key words:** prestressed combined systems of strut type, constructive nonlinearity, periodic shutdown of binders, introduction of binders, form of a binder.

**Введение.** Шпренгельные системы представляют собой жесткий элемент (балку), усиленный одной или несколькими затяжками. Эти конструкции в условиях эксплуатации подвержены воздействию как статических (собственный вес, технологическое оборудование и т. п.), так и динамических нагрузок (ветровых, аварийных, например, нагрузок промышленной сейсмики). Эти обстоятельства определяют необходимость динамического расчета таких конструкций (рис. 1).

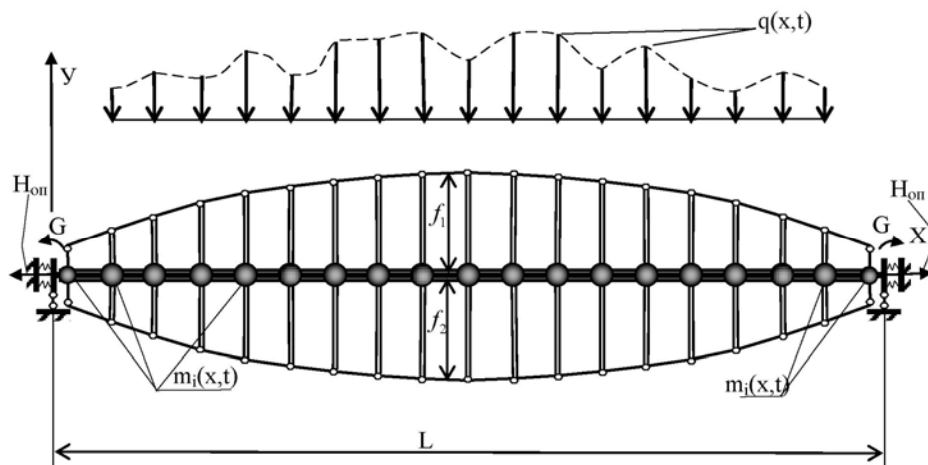


Рис. 1. Расчетная схема двухпоясной шпренгельной балки

Колебания рассматриваемых систем носят нелинейный характер. Факторами, обуславливающими геометрическую нелинейность, являются: упругий отпор предварительно напряженных затяжек, продольные и поперечные деформации. Конструктивная нелинейность проявляется скачкообразно вследствие попеременного отключения гибких элементов — затяжек.

Проблема динамики комбинированных конструкций — вантово-стержневых, висячих — стала разрабатываться сравнительно недавно, но привлекла внимание широкого круга исследователей [1—9].

Анализ методов динамического расчета предварительно напряженных комбинированных систем показывает, что, несмотря на значительное количество исследований, отсутствуют расчетные модели, адекватно отражающих как их нелинейные свойства, так и комбинаторное воздействие статических и динамических воздействий, историю динамического нагружения и т. п.

*Постановка задачи.* Для решения этой задачи в [10] предложена механико-математическая модель поперечных колебаний предварительно напряженных комбинированных систем шпренгельного типа, учитывающая влияние геометрической и конструктивной нелинейности, а также многофакторный характер их нагружения и эксплуатации (см. рис. 1). В настоящей работе представлен случай поперечных колебаний шпренгельных систем.

*Допущения:*

- 1) материал балки жесткости и затяжек работает в упругой стадии;
- 2) контур поперечного сечения балки жесткости считается недеформируемым;
- 3) стойки являются абсолютно жесткими и установлены с шагом  $n$ ,  $n < L$ ;
- 4) линии действия нагрузок проходят через центр тяжести балки жесткости, положение которого совпадает с центром изгиба;
- 5) внешним сопротивлением среды, перемещениями системы и инерционными усилиями, возникающими вдоль продольной оси  $X$ , пренебрегаем.

Для условий колебания системы в одной плоскости уравнение имеет следующий вид [10]:

$$m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \sum_{i=1}^N H_i \left( \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f_i}{\partial x^2} \right) - H_{\text{оп}} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + EI \frac{\partial^4 (y - y_0)}{\partial x^4} + 2\xi \frac{\partial^5 y}{\partial x^4 \partial t} = q(x). \quad (1)$$

*Граничные условия:*

$$y|_{x=0} = 0; \quad y|_{x=l} = 0; \quad \left. \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right|_{x=0,l} = \frac{\sum_{i=1}^N C_i H_i|_{x=0,l}}{EI}. \quad (2)$$

Здесь  $m(x)$  — удельная (на единицу длины) масса балки;  $y(x, t)$  — поперечная координата оси балки;  $y_0(x)$  — начальная координата оси балки;  $f_i(x)$  — форма  $i$ -й затяжки;  $t$  — время;  $i$  — номер затяжки;  $N$  — количество затяжек;  $H_i(x, t)$  — проекция усилия в  $i$ -й затяжке на ось  $x$ ;  $H_{\text{оп}}(t)$  — суммарное усилие в торцевой заделке;  $EI$  — изгибная жесткость балки жесткости;  $\xi$  — коэффициент внутреннего сопротивления (принят в форме, предложенной В. В. Болотиным [11]);  $q = q(x, t)$  — внешняя нагрузка;  $C_i$  — эксцентриситет крепления  $i$ -й затяжки.

Для решения данного уравнения использовалась явная схема Рунге — Кутты — Мерсона четвертого порядка точности по времени с автоматическим контролем точности решения. Для дискретизации по пространству использовались центрально-разностная схема второго порядка точности [10].

Как видно из структуры уравнения (1), параметрами, влияющими на характеристики поперечных колебаний шпренгельной системы, являются:

форма очертания и вынос затяжек, характеризующиеся параметрами  $f_i(x)$  и  $C$ ;

суммарные усилия в затяжках  $\sum_{i=1}^N H_i$  и их составная часть — усилия

предварительного напряжения  $\sum_{i=1}^N H_{0i}$ , обуславливающие их упругий отпор и распор в балке жесткости.

Оценим влияние формы и выноса затяжек, усилий предварительного напряжения, амплитуды колебаний на частотные характеристики системы. Частотной характеристикой системы будем считать частоту основного тона колебаний (по одной полуволне). Затухание амплитуд колебаний не учитываем.

Для численного анализа рассмотрим шпренгельные системы при следующих исходных данных: пролет  $L = 12$  м; характеристики балки жесткости:  $E_6 = 2,1 \cdot 10^5$  МПа,  $I_6 = 4,65 \cdot 10^{-4}$  м<sup>4</sup>,  $A_6 = 25 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>,  $W = 3 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>,  $R_{y6} = 240$  МПа; характеристики затяжки:  $E_3 = 2,1 \cdot 10^5$  МПа, они очерчены по квадратным параболам с  $\frac{f}{L} = \frac{1}{2400} \dots \frac{1}{6}$ ,  $\mu = \frac{E_3 A_3}{E_6 A_6} = 0 \dots 1$ ;  $C = 0 \dots f$ ,

$R_{y3} = (1 \dots 3) R_{y6}$ ,  $\bar{H}_0 = 0 \dots R A_6$ ;  $m = 20$  кг/м.

Очертание оси балки жесткости при начальном возмущении — парабола с вершиной в середине пролета  $y_v$ .

Форма очертания затяжек  $f_i(x)$  и эксцентриситет их крепления к балке жесткости  $C_i$ . Вынос затяжек  $\frac{f}{L} = \frac{1}{20}$ , согласно [12], система осцилляционна.

Для определения частоты собственных колебаний создадим в шпренгельной системе начальное возмущение, представляющее изгиб по параболической

кривой с  $y_v^{\max} = y_v(x) = \frac{1}{1500} L$ . Затяжки при этом не отключаются  $H_i \geq 0$ .

Спектральный анализ осциллограмм колебаний производим по специально разработанной программе ForceT.

На рис. 2 приведены данные об изменчивости частоты собственных колебаний  $\omega$  при вышеперечисленных изменениях параметров шпренгельной системы.

За исходную позицию  $\omega = 1$  принимаем частоту колебаний системы при  $C = 0$ . Видно, что распрямление затяжки  $C \rightarrow f$  приводит к снижению частот  $\omega$ . Частота колебаний исходной системы в четыре раза больше, чем у системы аналогичных габаритов с прямолинейными затяжками ( $C = f$ ). Снижение частоты колебаний при увеличении эксцентриситета отмечается в исследованиях и других авторов [13].

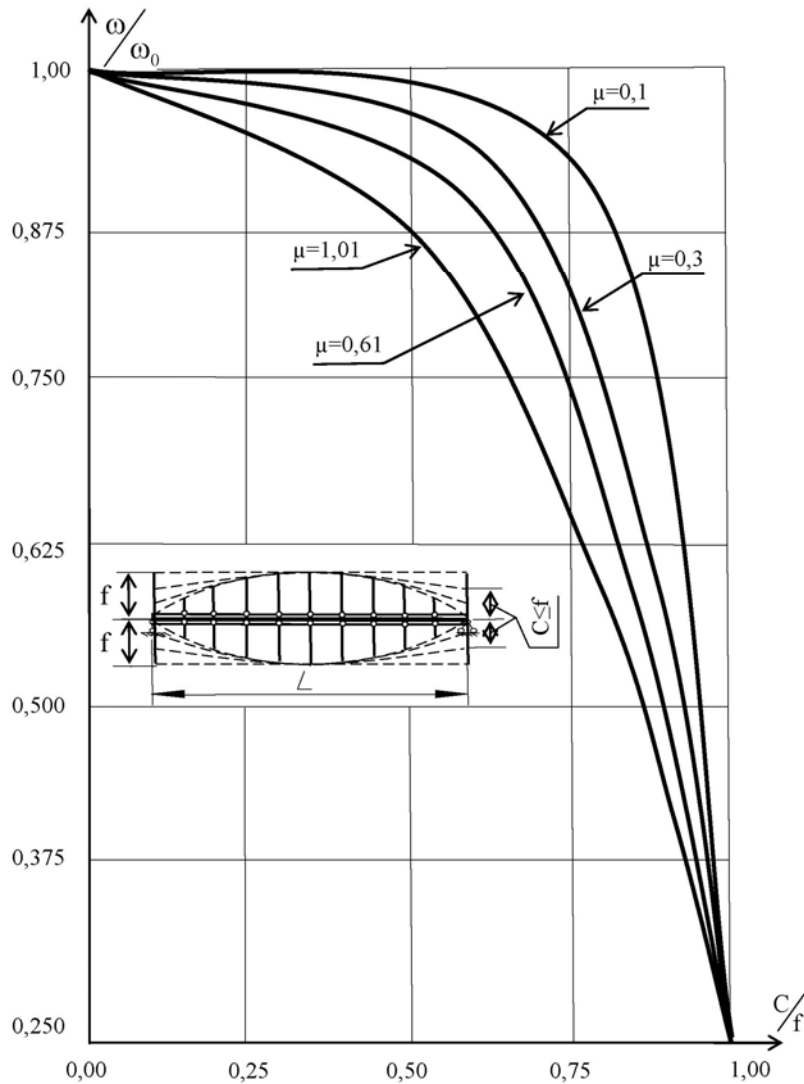


Рис. 2. Зависимость частоты собственных колебаний  $\omega$  шпренгельных систем от формы затяжек при различных значениях относительной жесткости затяжек  $\mu = \frac{E_3 A_3}{E_6 A_6}$ ;  $\omega_0$  — частота при  $C = 0$

Такой эффект объясняется снижением упругого отпора затяжек из-за уменьшения кривизны затяжек и соответственным уменьшением компоненты  $\frac{\partial^2 f_i}{\partial x^2}$  в уравнении (1).

Темп снижения частот колебаний больше у систем с относительно жесткими затяжками  $\mu = 0,6 \dots 1,0$ , и это понятно, так как относительное влияние затяжек на распределение усилий при колебаниях системы существенно больше. Таким образом, форма очертания затяжек является одним из существенных факторов, который определяет частотные характеристики системы. За счет изменения формы затяжек появляется возможность управления

динамическими характеристиками шпренгельных систем. При этом для повышения частной характеристики следует назначать формы очертания затяжек по кривым второго и высших порядков.

*Вынос затяжек  $f_{max}$ .* Рассмотрим шпренгельную систему с характеристиками представленными выше. Вынос затяжек примем в интервале  $\frac{f}{L} = 0 \dots \frac{1}{12}$ .

Оценим частотные характеристики при различных значениях относительной жесткости затяжки  $\mu$ . На рис. 3 представлены результаты численного анализа. Видно, что увеличение выноса затяжек существенно повышает частоту собственных колебаний. Более интенсивный рост наблюдается у систем с затяжками большей величиной  $\mu$ .

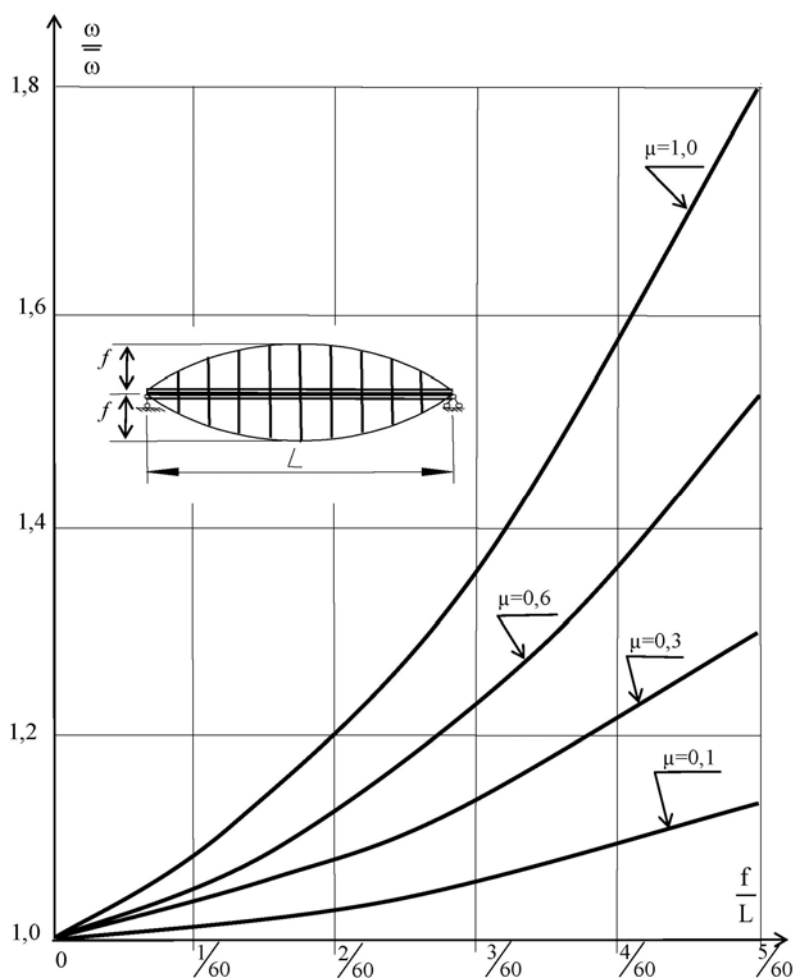


Рис. 3. График зависимости величин собственных частот колебаний  $\frac{\omega}{\omega_0}$  от выноса затяжек  $\frac{f}{L}$  при различных величинах их осевой жесткости  $\mu = \frac{E_3 A_3}{E_6 A_6}$ ;  $\omega$  — частота при  $f = 0$



Величина и характер начального возмущения системы  $y_v = y_v(x)$ . Собственные колебания упругих систем при соблюдении условия малости амплитуд не зависят от величины возмущений, что следует из многочисленных классических исследований [11, 12, 14, 15, 16].

Рассмотрим процесс собственных колебаний двухпоясных шпренгельных систем при различных величинах начального возмущения. Для единообразия численного эксперимента форму начального возмущения примем по одной полуволне с очертанием по квадратной параболе и максимальным начальным отклонением от положения равновесия в середине пролета  $y_v = 1/1200 \dots 60/1200$ . При этом на каждом этапе эксперимента будем определять частоту собственных колебаний по одной полуволне и контролировать работу затяжек — выполнение или невыполнение условий  $H_i \geq 0$ .

На рис. 4 представлены интегрированные данные об изменчивости частот собственных колебаний при различных параметрах шпренгельных систем и величинах начального возмущения.

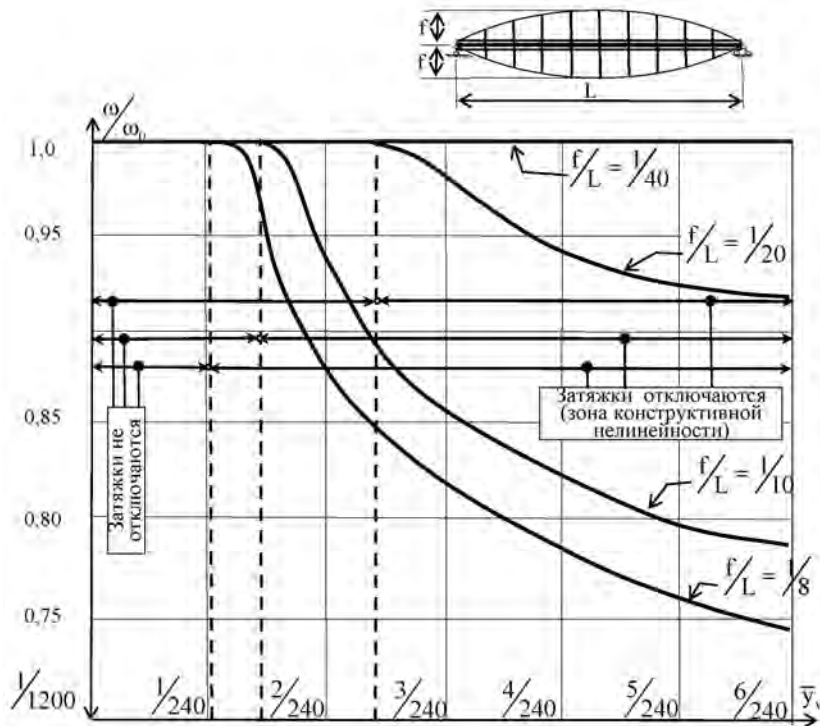


Рис. 4. Изменение частот собственных колебаний  $\omega$  в зависимости от величины начального возмущения  $\bar{y} = \frac{y_v}{L}$  при различных выносах затяжек  $\frac{f}{L}$ :  $\omega_0$  — частота колебаний при неотключенных затяжках; ----- — границы отключения затяжек

Видно, что при изменении амплитуды колебаний для каждой системы имеются две зоны: с постоянной и переменной частотой колебаний. Это объясняется, с одной стороны, периодическим отключением затяжек и соответствующим периодическим скачкообразным изменением расчетной схемы.

Возникает эффект, заключающийся в попеременном натягивании и ослаблении затяжек. В расчетном плане в течение одного периода колебаний система попеременно изменяет свою расчетную схему в следующей последовательности: система с двумя напряженными затяжками  $\rightarrow$  отключенной верхней затяжкой  $\rightarrow$  двумя напряженными затяжками  $\rightarrow$  отключенной нижней затяжкой  $\rightarrow$  двумя напряженными затяжками и т. д. Данное обстоятельство влияет на параметр  $\frac{\partial^2 f_i}{\partial x^2}$  уравнения (1). С другой стороны, при изменении количества работающих затяжек изменяются суммарные усилия распора в балке жесткости  $\sum_{i=1}^N H_i$ . Периодические отключения затяжек и изменчивость распора в балке жесткости существенным образом отражаются на величине второго слагаемого уравнения (1), что в итоге приводит к изменению частотной характеристики системы.

*Предварительное напряжение затяжек  $H_0$ .* Оценим влияние начального натяжения затяжек на частотную характеристику шпренгельных систем и на процесс их колебаний в целом.

Для этого используем исходные данные, приведенные в начале статьи, сделав переменной величину  $H_0$ .

Результаты численного анализа представлены на рис. 5.

Наименьшую величину возмущения системы примем равной  $\bar{y}_v = \frac{1}{1200}$ , обеспечив при этом работу затяжек при минимальном значении относительного предварительного натяжения затяжек  $\bar{H} = 0,025$ . С ростом усилий предварительного натяжения затяжек у системы при  $\bar{H} = 0,025$  и  $\bar{y}_v = \frac{1}{1200}$  наблюдается монотонное и относительно незначительное уменьшение величин  $\omega$ . Снижение частоты собственных колебаний  $\omega$  является следствием геометрической нелинейности системы, связанной с изменением ее расчетной схемы, и объясняется относительным уменьшением возвращающей силы при колебаниях системы, обусловленной увеличением составляющей  $\sum_{i=1}^N H_i \left( \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right)$  в уравнении (1). Полученный результат согласуется с ранее проведенными исследованиями на иных расчетных моделях [6].

Для других шпренгельных систем назначим величины начального возмущения  $\bar{y}_v = \frac{1}{800} \dots \frac{1}{40}$ . График изменчивости частоты колебаний состоит из двух частей. При начальных значениях предварительного напряжения затяжки, с принятой амплитудой колебаний  $\bar{y}_v = \frac{1}{800} \dots \frac{1}{40}$ , периодически отключаются. С увеличением  $H_0$  относительное время отключения уменьшается, что приводит к росту частот колебаний. Как только затяжки перестают отключаться (пропадает эффект конструктивной нелинейности), частота снижается по причинам, аналогичным для системы с  $\bar{y}_v = \frac{1}{1200}$ .

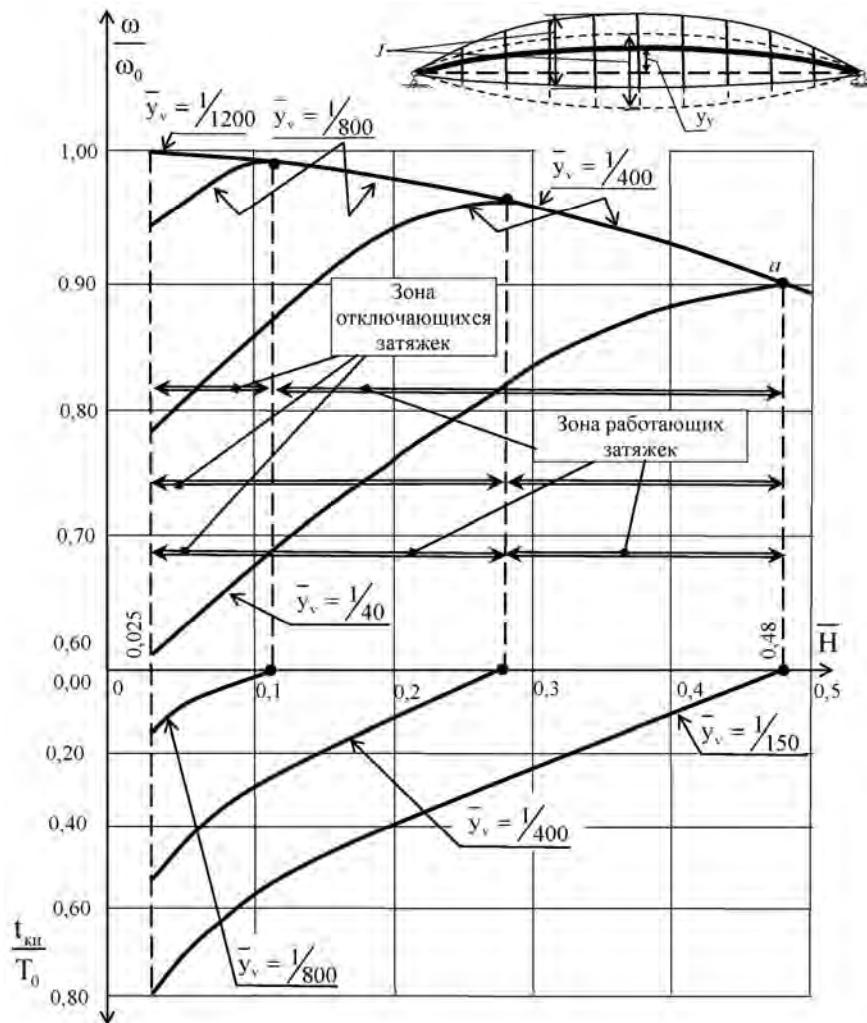


Рис. 5. Зависимость частоты  $\omega$  собственных колебаний от величины усилий предварительного напряжения  $H_0$  при различных величинах начального возмущения по одной полуволне  $\bar{y} = \frac{y_v}{L}$ :  $\omega_0$  — частота колебаний системы при  $\bar{y}_v = \frac{1}{1200}$ ,  $\bar{H} = 0,025$ ;  $\bar{H} = \frac{H_0}{R_y A_0}$  — приведенные усилия натяжения затыжек;  $\frac{t_{\text{кн}}}{T_0}$  — относительное время отключения затыжек;  $T_0$  — период колебаний

**Выводы.** Численный анализ динамической работы двухпоясных шпренгельных систем показал, что вынос и форма очертания затыжек существенным образом воздействуют на их частотные характеристики. В отличие от стержневых конструкций, комбинированные обладают особыми свойствами: на частоту их собственных колебаний, при периодическом отключении затыжек, оказывают влияние и амплитуды свободных колебаний, и усилия предварительного напряжения затыжек.

Периодическое отключение затыжек, как фактор конструктивной нелинейности, при колебаниях по симметричным формам приводит к снижению

частоты собственных колебаний. Искусственное регулирование усилий в затяжках позволяет активно влиять на динамические характеристики шпренгельных систем.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Казакевич М. И., Мелашвили Ю. К., Сулаберидзе О. Г.* Аэродинамика висячих покрытий. Киев : Будівельник, 1983. 104 с.
2. *Ивович В. А.* Динамический расчет висячих конструкций. М. : Стройиздат, 1975. 191 с.
3. *Шимановский В. Н.* Висячие системы (Конструкции и расчет нитей конечной жесткости). Киев : Будівельник, 1984. 208 с.
4. *Дмитриев Л. Г., Касилов А. Г.* Вантовые покрытия. Расчет и конструирование. 2-е изд, перераб. и доп. Киев : Будівельник, 1974. 272 с.
5. *Корчинский И. Л., Гриль А. А.* Расчет висячих покрытий на динамические воздействия (землетрясения, ветер). М. : Стройиздат, 1978. 220 с.
6. *Никольский М. Д., Клещев Н. Е.* Вариационная постановка и численные методы расчета гибких упругих стержней // Проблемы прочности материалов и конструкций на транспорте : тезисы докладов на III Международной конф. СПб, 1995. С. 99.
7. Xuan suo qiao sheji // Lei Junqing bianzhu. Beijing : Renmin jiaotong chubanshe, 2001. 452 p.
8. *Sun C. T., Bai J. M.* Vibration of multi-of-freedom systems with nonproportional viscous damping // Int. J. of Mechanical Sciences. 1995. V. 37. № 4. P. 441—455.
9. *Faella C., Martinell E., Nigra E.* Steel and concrete composite beams with flexible shear connection: exact analytical expression of the stiffness matrix and application. Computer & Struct, 2002.
10. *Егоров В. В.* Развитие конструктивных форм и методов расчета комбинированных систем шпренгельного типа : дис. ... д-ра техн. наук. СПб, 2004. 535 с.
11. *Болотин В. В.* Динамическая устойчивость упругих систем. М. : ГИТТЛ, 1956. 600 с.
12. *Гайдаров Ю. В., Голубев А. А.* Расчет на ударную нагрузку и свойства малых колебаний многостоечного шпренгеля // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1976. № 1. С. 41—45.
13. *Бабий В. П.* К теории поперечных колебаний эксцентрично предварительно напряженной металлической балки // Прикладная механика. Т. 2. Вып. 7. 1966. С. 109—118.
14. *Тимошенко С. П.* Колебания в инженерном деле. М. : Физматгиз, 1959. 439 с.
15. *Романов В. П.* Поперечные колебания многостоечной шпренгельной системы с гибкими тросовыми затяжками // Пространственные конструкции : тр. ЛенЗНИЭП. Л., 1974.
16. *Тимошенко С. П.* Теория колебаний в инженерном деле. М., 1932.
1. *Kazakevich M. I., Melashvili Yu. K., Sulaberidze O. G.* Aerodinamika visyachikh pokrytiy. Kiev : Budiivelnik, 1983. 104 s.
2. *Ivovich V. A.* Dinamicheskiy raschet visyachikh konstruktsey. M. : Stroyizdat, 1975. 191 s.
3. *Shimanovskiy V. N.* Visyachie sistemy (Konstruktsii i raschet nitey konechnoy zhestkosti). Kiev : Budivel'nik, 1984. 208 s.
4. *Dmitriev L. G., Kasilov A. G.* Vantovye pokrytiya. Raschet i konstruirovanie. 2-e izd, pere-rab. i dop. Kiev : Budivel'nik, 1974. 272 s.
5. *Korchinskiy I. L., Gril' A. A.* Raschet visyachikh pokrytiy na dinamicheskie vozdeystviya (zemletryaseniya, veter). M. : Stroyizdat, 1978. 220 s.
6. *Nikol'skiy M. D., Kleshchev N. E.* Variatsionnaya postanovka i chislennyye metody rascheta gibkikh uprugikh sterzhney // Problemy prochnosti materialov i konstruktsey na transporte : tezisy dokladov na III Mezhdunarodnoy konf. SPb, 1995. S. 99.
7. Xuan suo qiao sheji // Lei Junqing bianzhu. Beijing : Renmin jiaotong chubanshe, 2001. 452 p.
8. *Sun C. T., Bai J. M.* Vibration of multi-of-freedom systems with nonproportional viscous damping // Int. J. of Mechanical Sciences. 1995. V. 37. № 4. P. 441—455.
9. *Faella C., Martinell E., Nigra E.* Steel and concrete composite beams with flexible shear connection: exact analytical expression of the stiffness matrix and application. Computer & Struct, 2002.
10. *Egorov V. V.* Razvitie konstruktivnykh form i metodov rascheta kombinirovannykh sistem shprengel'nogo tipa : dis. ... d-ra tekhn. nauk. SPb, 2004. 535 с.
11. *Bolotin V. V.* Dinamicheskaya ustoychivost' uprugikh sistem. M. : GITTL, 1956. 600 s.

- 
12. Gaydarov Yu. V., Golubev A. A. Raschet na udarnuyu nagruzku i svoystva mal'kikh kolebaniy mnogostoechnogo shprengelya // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura. 1976. № 1. S. 41—45.
  13. Babiy V. P. K teorii poperechnykh kolebaniy eksstentrichno predvaritel'no napryazhennoy metallicheskoй balki // Prikladnaya mekhanika. T. 2. Vyp. 7. 1966. S. 109—118.
  14. Timoshenko S. P. Kolebaniya v inzhenernom dele. M. : Fizmatgiz, 1959. 439 s.
  15. Romanov V. P. Poperechnye kolebaniya mnogostoechnoy shprengel'noy sistemy s gibkimi trosovymi zatyazhkami // Prostranstvennye konstruksii : tr. LenZNIEP. L., 1974.
  16. Timoshenko S. P. Teoriya kolebaniy v inzhenernom dele. M., 1932.

© Егоров В. В., Григорьев П. Н., 2014

*Поступила в редакцию  
в феврале 2014 г.*

*Ссылка для цитирования:*

*Егоров В. В., Григорьев П. Н. О динамических характеристиках шпренгельных систем // Вестник Волгogr. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 52—61.*

УДК 699.86

**С. В. Корниенко**

### **ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫЙ РЕЖИМ И ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ С КРАЕВЫМИ ЗОНАМИ**

Разработан метод расчета температурно-влажностного режима в трехмерных областях ограждающих конструкций на основе математической модели совместного нестационарного теплообмена. Показано, что в ограждающих конструкциях с теплотехническими неоднородностями происходит локализация температуры и влагосодержания с образованием сложных краевых эффектов и снижение уровня теплозащиты. Намечены пути совершенствования ограждающих конструкций с краевыми зонами.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** температурно-влажностный режим, потенциал влажности, математическая модель, теплозащита здания, программно-вычислительный комплекс.

The method of calculation of temperature and humidity conditions for three-dimensional areas of enclosing structures on the basis of mathematical model of joint non-stationary heat and moisture transfer is developed. It is shown that in thermal bridges of enclosing structures there is temperature and moisture content localization with formation of difficult edge effects and decrease of thermal protection. The ways of improvement of enclosing structures with edge zones are planned.

**Key words:** temperature and humidity conditions, moisture potential, mathematical model, building thermal protection, program computer complex.

Известно, что температурно-влажностный режим определяет эксплуатационные свойства ограждающих конструкций зданий. Он непосредственно влияет на теплозащитные и прочностные свойства, санитарно-гигиеническое состояние, надежность и долговечность ограждений.

В современном строительстве широко используют ограждающие конструкции с эффективными утеплителями. Такие конструкции повышают требования к качеству проектирования, поскольку неоднородность применяемых материалов усугубляет возможные ошибки проектирования и приводит к снижению теплозащитных свойств и долговечности конструкций. Выбор конструктивного решения на стадии проектирования связан с проблемой долгосрочного прогноза температурно-влажностного режима ограждающих конструкций при нестационарных условиях теплообмена. Наиболее сложным является прогноз температурно-влажностного режима теплотехнически неоднородных участков (краевых зон) наружных ограждений. Перенос тепла и влаги в краевых зонах происходит по двух- и трехмерной схемам. Локализация влаги на этих участках выше допустимых значений приводит к ухудшению влажностного режима, снижая теплозащиту и срок эксплуатации всего здания.

Повышение требований к качеству проектирования приводит к необходимости исследования совместного нестационарного теплообмена в строительных материалах и разработки метода расчета температурно-влажностного режима в трехмерных областях ограждающих конструкций при оценке теплозащиты зданий. Этим определяется актуальность проблемы.

В ограждающих конструкциях влагообмен происходит под влиянием разности влагосодержаний, давлений, температур и сил, вызванных разными энергиями связи в соприкасающихся материалах. Для анализа сложных про-

цессов влагопереноса в ограждающих конструкциях наиболее удобна математическая модель, основанная на потенциале влажности. При использовании этой модели можно рассматривать процесс влагообмена в широком диапазоне влажности и температуры с учетом перемещения влаги в парообразном и жидком состояниях под действием различных сил.

Наиболее общая оценка влажностного режима наружных ограждений может быть получена на основе теории потенциала влажности, разработанной В. Н. Богословским [1]. В 1952 г. он предложил метод расчета влагопередачи в ограждающих конструкциях, основанный на потенциале влажности, который по термодинамическому смыслу является полным потенциалом. С помощью потенциала влажности Богословского можно учесть все силовые факторы, действующие на влагу. Движение влаги совместно в парообразной и жидкой фазах определяется градиентом потенциала влажности, а накопление влаги — влагоемкостью, выраженной через изменение потенциала влажности.

Физико-математическое обоснование метода потенциала влажности дано в работах А. В. Лыкова, где подчеркнуто единство явлений тепло- и массообмена, а для их описания использован аппарат термодинамики необратимых процессов.

В дальнейшем теория потенциала влажности развивалась В. Н. Богословским и его учениками: Е. И. Тертичником, А. М. Микшером, Б. В. Абрамовым и др. Развитию теории и практики потенциала влажности посвящены работы Л. М. Никитиной, В. Г. Гагарина, А. Г. Перехоженцева, К. Kießl, Н. М. Künzel.

Проблема прогноза температурно-влажностного режима в трехмерных областях ограждающих конструкций ввиду ее чрезвычайной сложности мало изучена.

В данной статье приведены основные результаты научных исследований совместного нестационарного влаготеплопереноса в трехмерных областях ограждающих конструкций при оценке их температурно-влажностного режима и теплозащитных свойств.

Для построения математической модели тепловлагопереноса разработаны теоретические основы состояния и переноса влаги в материалах ограждающих конструкций [2].

На основе термодинамики влажного материала разработана шкала абсолютного потенциала влажности, определяемого по формуле

$$\theta = -135,3 \ln(1 - \varphi), \quad (1)$$

где  $\varphi = p/p_s$  — относительное парциальное давление водяного пара в материале при эталонной температуре 20 °С.

Абсолютный потенциал влажности, определяемый формулой (1), показывает изменение удельной энергии системы «влажный материал — воздух» при изменении парциального давления водяного пара в материале по сравнению с давлением насыщенного водяного пара при эталонной температуре. Использование в качестве эталонного тела для построения этой шкалы влажного воздуха в порах материала исключает влияние вида материала и повышает точность определения потенциала влажности. Влияние температуры исключается определением потенциала влажности при эталонной температуре. Если влажное

тело имеет произвольную температуру, то его абсолютный потенциал влажности равен абсолютному потенциалу влажности тела, которое находится с ним в состоянии неизотермического влажностного равновесия и имеет эталонную температуру. На основе установленной связи между различными шкалами потенциала влажности показано, что абсолютный потенциал влажности является характеристикой влажностного состояния материала в неизотермических условиях.

На основе предложенной автором шкалы абсолютного потенциала влажности определены другие характеристики состояния влаги в материале: относительный потенциал влажности, абсолютная и относительная удельная влагоемкость материала.

Разработанные характеристики состояния влаги в материалах ограждающих конструкций позволяют расширить границы определения влажностного состояния, включая зону сверхсорбционной влажности.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования характеристик переноса влаги в материалах ограждающих конструкций [2]. Разработана методика экспериментального определения характеристик переноса влаги при эталонной температуре путем сушки влажных материалов от полного водонасыщения. В результате получены экспериментальные зависимости коэффициента влагопроводности от абсолютного потенциала влажности для ряда материалов и коэффициент влагообмена.

Разработанные характеристики состояния и переноса влаги в строительных материалах включены в базу данных [2] и использованы для моделирования тепловлагоденоса в ограждающих конструкциях зданий.

Разработан метод численного решения трехмерной задачи совместного нестационарного тепловлагоденоса в ограждающих конструкциях зданий.

Математическая модель рассматриваемого процесса описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка параболического типа с переменными коэффициентами

$$C_h(t, \theta) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \lambda_h(t, \theta) \frac{\partial t}{\partial x_i} \right], \quad (2)$$

$$C_m(t, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \lambda_m(t, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right], \quad (3)$$

где  $t$  — температура;  $\theta$  — абсолютный потенциал влажности;  $\tau$  — время;  $x_i$  — пространственная координата ( $i = 1, 2, 3$ );  $C_h, C_m$  — соответственно объемная теплоемкость и влагоемкость материала;  $\lambda_h, \lambda_m$  — соответственно коэффициент теплопроводности и влагопроводности материала.

Тепловлагообмен на границе поверхности ограждения с окружающей средой описывается граничными условиями третьего рода. Тепловлагообмен на стыках материалов ограждения описывается граничными условиями четвертого рода. Распределение температуры и абсолютного потенциала влажности в начальный момент времени задается начальными условиями.

Использование шкалы абсолютного потенциала влажности позволяет существенно упростить модель тепловлагоденоса. Поскольку абсолютный потенциал влажности характеризует влажностное состояние материалов в неизо-



термических условиях, а влагопередача определяется градиентом потенциала, то уравнение влагопроводности записано без дополнительных источников (стоков) влаги. Теплота фазовых переходов влаги в уравнении теплопроводности также не учитывается, так как вклад этой теплоты в температурное поле сравним с ошибкой за счет осреднения многолетних климатических данных.

Численное решение задачи получено методом конечно-разностной аппроксимации дифференциальных уравнений.

Разработанная математическая модель реализована в компьютерной программе, которая позволяет производить расчет нестационарных температурных и влажностных полей в трехмерных областях ограждающих конструкций в годовом цикле эксплуатации в широком диапазоне влажности при сложных граничных условиях. Достоверность разработанного метода подтверждается результатами тестирования, проведенного различными способами. Компьютерная программа зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ Федерального института промышленной собственности и включена в состав программно-вычислительного комплекса «Энергоэффективность и тепловая защита зданий (ЭНТЕЗА)» [3], использованного более чем на 30 объектах жилищно-гражданского и промышленного строительства на территории г. Волгограда и Волгоградской области, а также других регионов Российской Федерации.

Результаты численного моделирования могут быть использованы для оценки влияния температурно-влажностного режима в краевых зонах ограждающих конструкций на их теплозащитные свойства.

Разработана методика расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций с учетом температурно-влажностного режима в краевых зонах [3]. Для ограждающей конструкции, содержащей  $l$  краевых зон, расчетное приведенное сопротивление теплопередаче определяется по формуле

$$R_h^{red} = \frac{R_h^{con}}{1 + \frac{1}{A} \sum_{i=1}^l k_i^{ez} A_i^{ez}}, \quad (4)$$

где  $R_h^{con}$  — сопротивление теплопередаче по глади ограждающей конструкции;  $A$  — площадь ограждающей конструкции;  $k_i^{ez}$ ,  $A_i^{ez}$  — соответственно коэффициент влияния и площадь зоны влияния  $i$ -й краевой зоны.

Под зоной влияния краевой зоны понимается область локального нарушения однородности температурного поля конструкции, вызванного этой краевой зоной. Коэффициент влияния характеризует добавочный тепловой поток через краевую зону конструкции, отнесенный к тепловому потоку по глади в пределах площади зоны влияния краевой зоны. Параметры  $k_i^{ez}$ ,  $A_i^{ez}$  определяются на основе расчета температурно-влажностного режима по температурному полю [3].

Разработанная методика позволяет оценить влияние краевых зон на теплозащитные свойства ограждающих конструкций. Оценка теплозащитных свойств ограждений производится путем сравнения расчетного приведенного сопротивления теплопередаче, определяемого по формуле (4), с нормируемым или базовым значением.

На примере проекта 9-этажного жилого здания серии «Дом—2000 КП» выполним оценку температурно-влажностного режима и теплозащитных свойств наружных стен. Наружные стены здания представляют собой одно- и двухмодульные трехслойные керамзитобетонные панели с эффективным утеплителем из пенополистирольных плит. Толщина внутреннего слоя панели — 120 мм, наружного слоя — 80 мм, утеплителя — 150 мм. Внутренний и наружный слои панели соединяются между собой бетонными шпоночными связями [3]. Градусосутки отопительного периода  $D_d = 3965$  °С·сут/год. В конструкции стеновой панели выделим следующие краевые зоны: горизонтальный и вертикальный стыки панелей, оконные откосы, бетонные шпонки.

Результаты математического моделирования нестационарного тепловлагодопереноса показали, что в краевых зонах стеновых панелей происходит локализация температуры и влагосодержания с образованием сложных пространственно-временных эффектов, обусловленных совместным влиянием процессов тепло- и массообмена.

На рис. 1 и 2 приведены температурные и влажностные поля на стыке утеплителя с наружным слоем панели в зоне шпонки в середине января и июля, полученные на основе математического моделирования тепловлагодопереноса.

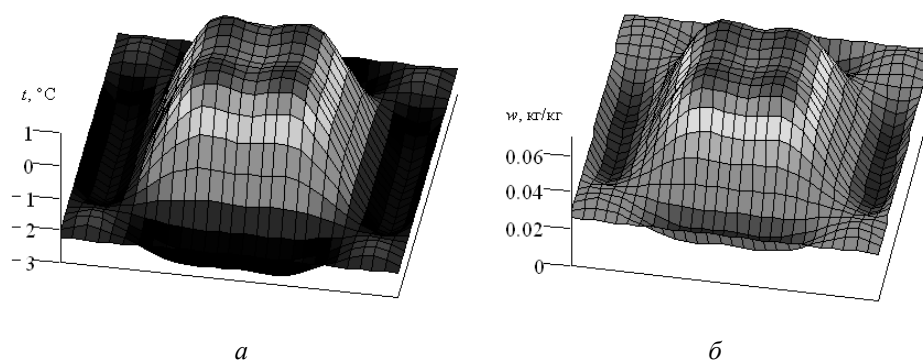


Рис. 1. Поля температуры (а) и влагосодержания (б) на стыке утеплителя с наружным слоем панели в зоне шпонки в середине января

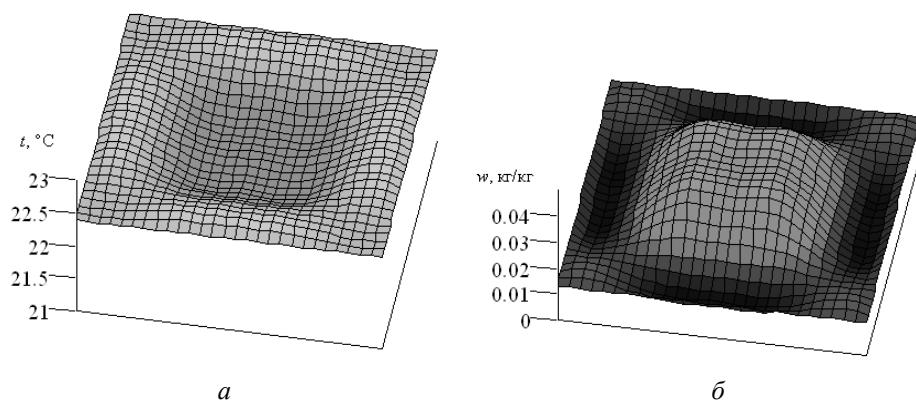


Рис. 2. Поля температуры (а) и влагосодержания (б) на стыке утеплителя с наружным слоем панели в зоне шпонки в середине июля

Как видно из рис. 1 и 2, вдали от шпонки ограждающая конструкция является теплофизически однородной. В зоне шпонки отмечается локализация температуры и влагосодержания (см. рис. 1). Из рис. 1 видно, что в утеплителе вокруг шпонки создается опасность накопления влаги в холодный период года.

При переходе к теплomu периоду года температурное поле выравнивается (см. рис. 2, а). В зоне шпонки происходит сушка материалов ограждения (см. рис. 2, б) с уменьшением локализации влагосодержания.

Анализ влажностного режима конструкции в течение отопительного периода показывает, что при переходе к холодному периоду года происходит накопление влаги в утеплителе. Среднее влагосодержание пенополистирольных плит составляет: к началу периода влагонакопления —  $1,4 \cdot 10^{-2}$  кг/кг; концу периода —  $1,68 \cdot 10^{-2}$  кг/кг; приращение за период влагонакопления —  $0,28 \cdot 10^{-2}$  кг/кг. Максимальное локальное влагосодержание к концу —  $2,4 \cdot 10^{-2}$  кг/кг. Поскольку среднее влагосодержание увлажняемого материала к концу периода влагонакопления меньше максимального сорбционного, то переувлажнение утеплителя в целом не происходит. Однако приближение максимального влагосодержания к концу периода влагонакопления к максимальному сорбционному создает возможность локального увлажнения утеплителя.

Проведенные расчеты показывают, что влажностный режим стабилизируется по отношению к внешним воздействиям спустя 2,5—3 года с момента ввода конструкции в эксплуатацию.

Оценка влияния температурно-влажностного режима на теплозащиту конструкции показывает, что в области шпонки сопротивление теплопередаче снижается на 28,4 %.

Значения коэффициента влияния и площади зоны влияния для краевых зон стеновых панелей, полученные на основе расчета температурно-влажностного режима, приведены в табл. 1.

Таблица 1

*Коэффициент влияния  $k_i^{ez}$  и площадь зоны влияния  $A_i^{ez}$  для краевых зон стеновых панелей*

| Краевая зона                                  | $k_i^{ez}$ | $A_i^{ez}, \text{м}^2$        |                               |
|-----------------------------------------------|------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                                               |            | для одно-<br>модульной панели | для двухмодуль-<br>ной панели |
| Горизонтальные стыки панелей                  | 0,15       | 2,1                           | 4,2                           |
| Вертикальные стыки панелей                    | 0,1        | 1,96                          | 1,96                          |
| Оконные откосы                                | 0,45       | 2,48                          | 5,8                           |
| Теплопроводные включения<br>(шпоночные связи) | 0,4        | 2,88                          | 4,32                          |

По проекту площадь одномодульной панели —  $6,15 \text{ м}^2$ , двухмодульной панели —  $10,9 \text{ м}^2$  (за вычетом световых проемов). Сопротивление теплопередаче по глади панелей  $R_h^{con} = 4,12 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ . При указанных данных по формуле (4) расчетное приведенное сопротивление теплопередаче одномодульной панели —  $R_{h1}^{red} = 2,84 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ , двухмодульной панели —  $R_{h2}^{red} = 2,8 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ . Снижение теплозащитных свойств двухмодульной панели объясняется, главным образом, большим влиянием оконных откосов. Согласно проекту,

суммарная площадь одномодульных панелей составляет 2/3 площади наружных стен. Расчетное приведенное сопротивление теплопередаче наружных стен  $R_h^{red} = 2,83 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ .

Результаты расчета теплозащитных показателей наружных стен приведены в табл. 2.

Таблица 2

*Теплозащитные показатели наружных стен*

| Наименование показателя                           | Обозначение, ед. изм.                         | Значение показателя |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------|
| Расчетное приведенное сопротивление теплопередаче | $R_h^{red}$ , $\text{м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ | 2,83                |
| Сопротивление теплопередаче по глади              | $R_h^{con}$ , $\text{м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ | 4,12                |
| Коэффициент теплотехнической однородности         | $r$                                           | 0,69                |

Согласно СНиП 23-02—2003 «Тепловая защита зданий», нормируемое значение сопротивления теплопередаче наружных стен  $R_h^{req} = 2,79 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ . Поскольку условие  $R_h^{red} \geq R_h^{req}$  выполняется, то проектное решение наружных стен отвечает поэлементному требованию по теплозащите зданий. Однако полученное значение коэффициента теплотехнической однородности свидетельствует о существенном влиянии краевых зон на теплозащиту ограждающих конструкций. Для повышения теплозащиты наружных стен необходимо снизить влияние краевых зон, прежде всего оконных откосов и теплопроводных включений. Некоторые приемы совершенствования конструктивного решения краевых зон рассмотрены в [3].

Сравним полученные результаты с имеющимися данными теплотехнических испытаний наружных стеновых панелей и фрагментов узлов в климатической камере [4]. В процессе серии теплотехнических испытаний определялся тепловой режим ограждающих конструкций путем измерения температурного поля на поверхности панели прямым контактным методом и с помощью откалиброванных термограмм. Развитие методов термографирования в зданиях приведено в [5]. Согласно экспериментальным данным, приведенным для аналогичной конструкции, понижение температуры на внутренней поверхности панели в зонах размещения жестких дискретных связей составляет около  $6 \text{ °C}$  (при температуре внутреннего воздуха  $t_{int} = 20 \text{ °C}$ , наружного воздуха —  $t_{ext} = -28 \text{ °C}$ ). Пересчет значений температур, полученных расчетом, на указанные температуры  $t_{int}$  и  $t_{ext}$  дает значение температуры в зоне дискретной связи, равное  $13,9 \text{ °C}$ , что хорошо согласуется с экспериментальными данными [4].

Полученный расчетом коэффициент теплотехнической однородности  $r = 0,69$  (см. табл. 2) хорошо согласуется с обобщенными данными ГОСТ Р 54851—2011 «Конструкции строительные ограждающие неоднородные. Расчет приведенного сопротивления теплопередаче» ( $r = 0,70 \dots 0,80$ ).

Согласование полученных результатов с экспериментальными и обобщенными данными свидетельствует о достоверности расчетных параметров.

Приведенные выше результаты исследований могут быть использованы для расчета удельных трансмиссионных теплопотерь и оценки энергоэффективности здания.

Материалы данной статьи были доложены автором и получили одобрение на международной научной конференции «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность», V Академические чтения, посвященные памяти академика РААСН Осипова Г. Л. в 2013 г.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Богословский В. Н.* Основы теории потенциала влажности материала применительно к наружным ограждениям оболочки зданий : монография ; под ред. В. Г. Гагарина. М. : МГСУ, 2013. 112 с.
2. *Корниенко С. В.* Методы инженерной оценки влажностного режима ограждающих конструкций на основе теории потенциала влажности : научное издание. Волгоград : ВолгГАСУ, 2011. 100 с.
3. *Корниенко С. В.* Повышение энергоэффективности зданий за счет снижения теплопотерь в краевых зонах ограждающих конструкций : научное издание. Волгоград : ВолгГАСУ, 2011. 108 с.
4. *Васильев Г. П., Личман В. А., Голубев С. С.* Результаты определения сопротивления теплоснабжению наружных стеновых панелей // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2012. Т. 4. № 4. С. 74—81.
5. *Revel G. M., Sabbatini E., Arnesalo M.* Development and Experimental Evaluation of a Thermography Measurement System for Real-Time Monitoring of Comfort and Heat Rate Exchange in the Built Environment // Measurement Science and Technology. 2012. Vol. 23. № 3.
1. *Bogoslovskiy V. N.* Osnovy teorii potentsiala vlazhnosti materiala primenitel'no k naruzhnym ograzhdeniyam obolochki zdaniy : monografiya ; pod red. V. G. Gagarina. M. : MGSU, 2013. 112 s.
2. *Kornienko S. V.* Metody inzhenernoy otsenki vlazhnostnogo rezhima ograzhdayushchikh konstruksiy na osnove teorii potentsiala vlazhnosti : nauchnoe izdanie. Volgograd : VolgGASU, 2011. 100 s.
3. *Kornienko S. V.* Povyshenie energoeffektivnosti zdaniy za schet snizheniya teplopoter' v kraevykh zonakh ograzhdayushchikh konstruksiy : nauchnoe izdanie. Volgograd : VolgGASU, 2011. 108 s.
4. *Vasil'ev G. P., Lichman V. A., Golubev S. S.* Rezul'taty opredeleniya soprotivleniya teploperedache naruzhnykh stenovykh paneley // AVOK: Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukh, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika. 2012. T. 4. № 4. S. 74—81.
5. *Revel G. M., Sabbatini E., Arnesalo M.* Development and Experimental Evaluation of a Thermography Measurement System for Real-Time Monitoring of Comfort and Heat Rate Exchange in the Built Environment // Measurement Science and Technology. 2012. Vol. 23. № 3.

© Корниенко С. В., 2014

Поступила в редакцию  
в декабре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

*Корниенко С. В.* Температурно-влажностный режим и теплозащитные свойства ограждающих конструкций с краевыми зонами // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 62—69.

УДК 699.841(05)

**А. В. Масляев**

### **ЗАЩИТА ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ РОССИИ В ЗДАНИЯХ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ**

В ряде сейсмических шкал используют показатель поведения людей на первых этажах зданий для определения интенсивности землетрясения. Ученые-сейсмологи и строители отмечают, что поведение людей зависит не только от интенсивности сейсмического воздействия, но и от динамических характеристик зданий. При этом ученые-медики утверждают, что при сильном землетрясении люди в зданиях получают психическую травму, которая обостряет у них «старые» и ускоряет возникновение «новых» болезней. Показана зависимость реакции людей при землетрясении от интенсивности, длительности сейсмического воздействия, основных характеристик зданий.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** сейсмическое воздействие, здоровье людей, реакция людей, период колебаний здания.

In some seismic scales the parameter of people's behaviour on the first floors of buildings is used to define the intensity of earthquake. Seismologists and builders mark that people's behaviour depends not only on the intensity of seismic influence, but also on the dynamic characteristics of buildings. Thus medical scientists assert that at strong earthquake people in buildings suffer emotional shock which aggravates "old" and accelerates "new" diseases. The dependence of people's reaction at earthquake on the intensity, duration of seismic influence, and basic characteristics of buildings is shown.

**К e y w o r d s:** seismic influence, people's health, people's reaction, period of fluctuations of a building.

Согласно анализу статей [1, 2], реакция людей в зданиях предопределяется в основном вибрационным воздействием их конструкций при землетрясении. В свою очередь специалисты в области биомеханики (наука, изучающая механические явления в живых организмах) свидетельствуют, что: «Биомеханика действия вибрации на человека зависит от характеристик возбуждения — его интенсивности, частоты и длительности; позы человека, места и направления вибрации по отношению к телу; состояния человека (в частности, степени мышечной активности, утомления, эмоциональной напряженности и др.), а также его индивидуальных особенностей» [3]. Поэтому в данной статье анализируются усредненная реакция населения некоторых городов бывшего СССР с учетом вибрационного воздействия разных типов зданий при землетрясениях, некоторые причины общей эмоциональной напряженности людей России перед землетрясением. Для установления зависимости усредненной реакции людей при землетрясении от интенсивности, длительности сейсмических воздействий, динамических характеристик зданий в начале 80-х гг. XX в. была создана комиссия из военных специалистов Министерства обороны СССР. Здесь следует сказать, что перед началом своей работы члены комиссии были ознакомлены с особенностями реакции людей в зданиях при землетрясении, определенными учеными-медиками:

- 1) стремление как можно быстрее, по наикратчайшим путям, даже через оконные проемы, выйти на безопасное открытое пространство;
- 2) на повторные очень слабые толчки в течение нескольких дней люди в зданиях могут реагировать как на основной сильный подземный толчок;

3) поведение людей в помещениях с одновременным пребыванием примерно 30 и более человек значительно усиливается за счет «эффекта толпы»;

4) поведение людей может усиливаться и от времени пребывания в зданиях (в закрытых помещениях реакция может возрасти примерно в 2—3 раза);

5) люди в зданиях при сильных землетрясениях получают психическую травму, которая приводит к потере их здоровья на длительное время.

Но, к сожалению, все перечисленные особенности поведения людей в зданиях при землетрясении до сих пор не учитываются в положениях Федеральных законов и нормативных документов РФ. Так, например, эвакуация людей из зданий при землетрясении проводится согласно положениям Федерального закона РФ № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (М. : Проспект, 2010), в которых эвакуационные пути решают с помощью набора целого ряда второстепенных помещений (коридоры, лестничные клетки, фойе и т. п.), что значительно увеличивает их протяженность и соответственно усиливает реакцию людей при землетрясении. Поэтому высокие и высотные здания за счет своих удлинённых эвакуационных путей являются своеобразными усилителями реакции людей при землетрясении. К тому же в верхних этажах этих зданий происходит увеличение сейсмического воздействия на людей до двух баллов за счет их конструктивного решения [4]. Именно эту мысль выразил в своем выступлении министр регионального развития РФ О. М. Говорун на совещании с руководителями региона Дальнего Востока, которое проводил Председатель правительства РФ Д. А. Медведев в июле 2012 г.: «Известный факт, что с возрастанием высоты зданий и сооружений кратно увеличивается интенсивность сейсмического воздействия на их конструкции!».

Члены комиссии исследовали поведение людей в разных типах зданий на территориях ряда городов при Газлийском (1984 г.), Кайраккумском (1985 г.), Кишиневском (1990 г.) землетрясениях. Оценка усредненной реакции людей в зданиях при землетрясениях проводилась с использованием макросейсмического метода нормативной сейсмической шкалы MSK-64 и метода математической статистики. При этом использовались выводы ученых-сейсмологов института физики Земли [5] о нормальном законе распределения степеней реакции людей в зданиях при землетрясении как случайной величины. Проверка распределения степеней реакции людей по всем объектам с использованием критерия согласия  $\chi^2$  Пирсона подтвердила нормальный закон их распределения. Вычисления объема выборки по всем объектам показали превышение экспериментальных данных над минимальными теоретическими. При проверке соответствия сейсмологической классификации степеней реакции людей в зданиях при землетрясении с медицинской классификацией психогенных расстройств при стихийных бедствиях и катастрофах по клиническим проявлениям [6] была выявлена их удовлетворительная сходимость. По исследованиям членов комиссии участок длительности сейсмических воздействий (при ускорении в грунте  $\geq 1 \text{ см/с}^2$ , что соответствует интенсивности воздействия в 2 балла и более) при 9-балльном Газлийском землетрясении был равен примерно 90 с, 8-балльном Кайраккумском землетрясении — примерно 7 с, 6-балльном Кишиневском землетрясении — примерно 30 с. По каждому объекту исследования интенсивность сейсмического воздействия в баллах определялась с учетом степени повреждения конструкций зданий (ведущий показатель), реакции людей и предметов быта. Интенсивность сейсмических

воздействий для сейсмостойких зданий определялась по проекту шкалы MMSK-84 [5], а для несейсмостойких зданий (г. Бухара) — по шкале MSK-64 [7]. Большие различия в характеристиках указанных землетрясений позволили впервые выявить влияние и длительности участка сейсмического воздействия на усредненную реакцию людей в зданиях. Степени реакции людей в зданиях определялись по проекту шкалы MMSK-84. В общей сложности было опрошено или проанкетировано около 3,5 тыс. чел. При использовании метода наименьших квадратов была определена эмпирическая зависимость между интенсивностью ( $J$ ), длительностью сейсмического воздействия ( $d$ ) и соответствующими усредненными степенями реакции ( $E$ ) людей в зданиях:

$$E = 1 \text{ (слабые ощущения)}$$

$$J = -0,03 d^2 - 0,02 d + 5,29; \quad (1)$$

$$E = 2 \text{ (сильные ощущения)}$$

$$J = 0,01 d^2 - 0,32 d + 6,67; \quad (2)$$

$$E = 3 \text{ (испуг)}$$

$$J = 0,004 d^2 - 0,22 d + 7,59; \quad (3)$$

$$E = 4 \text{ (сильный испуг)}$$

$$J = 0,007 d^2 - 0,27 d + 8,75; \quad (4)$$

$$E = 5 \text{ (паника)}$$

$$J = 0,004 d^2 - 0,20 d + 9,57; \quad (5)$$

$$E = 6 \text{ (сильная паника)}$$

$$J = 0,001 d^2 - 0,12 d + 10,32. \quad (6)$$

По расчетам этих формул построены графики усредненной реакции людей в зданиях в зависимости от интенсивности и продолжительности участка сейсмического воздействия (рис. 1). На рис. 1 в виде сплошных линий приведена динамика изменения каждой усредненной степени реакции людей (от  $E = 2$  до  $E = 6$ ) в зданиях при различной интенсивности и длительности участка сейсмического воздействия. Подставляя в соответствующие формулы (1—6) необходимые значения  $d$ , которые помещены во втором ряду по оси абсцисс на рис. 1, можно определить интенсивность сейсмического воздействия, при которой люди в зданиях будут проявлять усредненную степень реакции. Из приведенных графиков усредненных степеней реакции людей ( $E$ ) в зданиях (см. рис. 1) следует вывод, что в начальной фазе землетрясения увеличение продолжительности сейсмического воздействия от 15 до 45 с (в три раза) приводит к росту усредненной реакции людей примерно на одну степень. В заключительной фазе при увеличении длительности сейсмического воздействия от 45 до 90 с (в два раза) — примерно еще на одну степень. График на рис. 1 позволил сделать вывод, что усредненная реакция людей в зданиях зависит от интенсивности и длительности участка сейсмического воздействия.

В данном исследовании специалистами анализировалось также влияние этажности, конструктивных решений разных типов зданий высотой не более 5 этажей на усредненную реакцию людей при землетрясении. С этой целью



была выполнена оценка поэтажной усредненной реакции людей в 7 зданиях разного типа при 9-балльном Газлийском землетрясении на территории городов Бухара, Кагана и Самарканда (было опрошено 2092 чел.), в 5 зданиях разного типа при 8-балльном Кайраккумском землетрясении (на территории городов Кайраккума и Ленинабада было опрошено 952 чел.), в 6 разных кинотеатрах при 6-балльном Кишиневском землетрясении (на территории ряда городов Молдавской республики было опрошено 438 чел.). В основу этих исследований были положены выводы ученых-медиков и ряда ученых-строителей в этой области. Так, в статье [8] по данным расчета поэтажных средних квадратических значений виброскоростей конструкций разных типов зданий с различными периодами собственных колебаний определена поэтажная усредненная реакция людей в баллах в зависимости от интенсивности сейсмического воздействия, которая представлена в табл. 1 и 2.

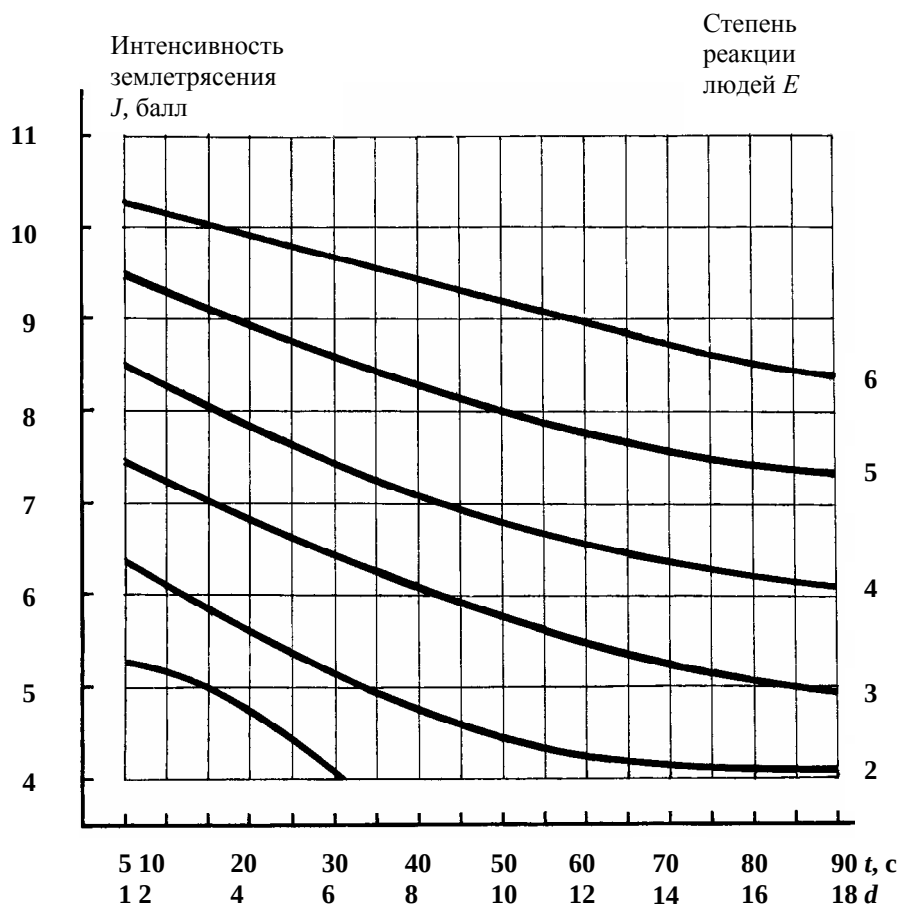


Рис. 1. Усредненная степень реакции людей в зданиях при различной интенсивности и длительности участка сейсмического воздействия:  $J$  — усредненная интенсивность сейсмического воздействия, при которой люди в зданиях проявляют соответствующую степень реакции;  $d$  — порядковый номер длительности сейсмического воздействия;  $t$ , с — длительность участка сейсмического воздействия при ускорении в грунте  $\geq 1 \text{ см/с}^2$  (время эвакуации из зальных помещений)

Таблица 1

*Позэтажная оценка воздействия на людей в баллах колебаний конструкций панельных зданий при землетрясениях 7, 8, 9 баллов*

| Интенсивность землетрясения (балл) | Номер этажа | Периоды собственных колебаний зданий, с |            |            |            |            |            |            |
|------------------------------------|-------------|-----------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                                    |             | $T = 0,10$                              | $T = 0,15$ | $T = 0,20$ | $T = 0,25$ | $T = 0,30$ | $T = 0,35$ | $T = 0,40$ |
| 7                                  | 1           | 7                                       | 7          | 7          | 7          | 8          | 8          | 8          |
|                                    | 2           | 7                                       | 7          | 7          | 8          | 8          | 8          | 8          |
|                                    | 3           | 7                                       | 7          | 8          | 8          | 8          | 8          | 8          |
|                                    | 5           | 7                                       | 8          | 8          | 8          | 8          | 8          | 8          |
| 8                                  | 1           | 7                                       | 8          | 8          | 8          | 8          | 8          | 9          |
|                                    | 2           | 7                                       | 8          | 8          | 8          | 9          | 9          | 9          |
|                                    | 3           | 7                                       | 8          | 8          | 8          | 9          | 9          | 9          |
|                                    | 5           | 7                                       | 8          | 9          | 9          | 9          | 9          | 9          |
| 9                                  | 1           | 8                                       | 8          | 9          | 9          | 9          | 9          | 9          |
|                                    | 2           | 8                                       | 8          | 9          | 9          | 9          | 9          | 9          |
|                                    | 3           | 8                                       | 9          | 9          | 9          | 9          | 9          | 9          |
|                                    | 5           | 8                                       | 9          | 9          | 9          | 9          | 9          | 9          |

Таблица 2

*Позэтажная оценка воздействия на людей в баллах колебаний конструкций каркасных зданий при землетрясениях 7, 8, 9 баллов*

| Интенсивность землетрясения (балл) | Номер этажа | Периоды собственных колебаний зданий, с |            |            |            |            |
|------------------------------------|-------------|-----------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
|                                    |             | $T = 0,20$                              | $T = 0,25$ | $T = 0,30$ | $T = 0,35$ | $T = 0,40$ |
| 7                                  | 1           | 7                                       | 7          | 8          | 8          | 8          |
|                                    | 2           | 8                                       | 8          | 8          | 8          | 8          |
|                                    | 3           | —                                       | —          | 8          | 8          | 8          |
|                                    | 4           | —                                       | —          | —          | —          | 9          |
| 8                                  | 1           | 8                                       | 8          | 8          | 8          | 9          |
|                                    | 2           | 8                                       | 8          | 9          | 9          | 9          |
|                                    | 3           | —                                       | —          | 9          | 9          | 9          |
|                                    | 4           | —                                       | —          | —          | —          | 9          |
| 9                                  | 1           | 9                                       | 9          | 9          | 9          | 9          |
|                                    | 2           | 9                                       | 9          | 9          | 9          | 9          |
|                                    | 3           | —                                       | —          | 9          | 9          | 9          |
|                                    | 4           | —                                       | —          | —          | —          | 9          |

Из расчетных данных табл. 1 следует, что в панельных зданиях с периодами собственных колебаний от 0,10 до 0,20 с при землетрясении происходит минимальное вибрационное воздействие конструкций на реакции людей в баллах. Для приближенной оценки значений периодов собственных колебаний зданий высотой до 5 этажей использовались эмпирические формулы проекта новых международных норм для строительства зданий в сейсмических районах (Строительство в сейсмических районах : Международные строительные нормы. МНТКС, 2001). В данной статье приводятся только отдельные рисунки поэтажной усредненной реакции людей в зданиях при землетрясениях. Поэтажная усредненная реакция людей в баллах в зданиях при землетрясениях сопоставлялась с поэтажной усредненной реакцией людей в

зданиях примерно с одинаковыми значениями периодов собственных колебаний, указанными в табл. 1 и 2. При этом выявлена удовлетворительная сходимость в динамике увеличения поэтажной усредненной реакции людей в зданиях, что позволило сделать следующие выводы:

- 1) в зданиях «жесткого» типа (панельные и кирпичные) увеличение усредненной реакции людей на один балл происходило с 3-го этажа (рис. 2, 3), а в зданиях «гибкого» типа (каркасные) (рис. 4) — со второго этажа;
- 2) влияние времени эвакуации с верхних этажей этих зданий на реакцию людей не было выявлено.

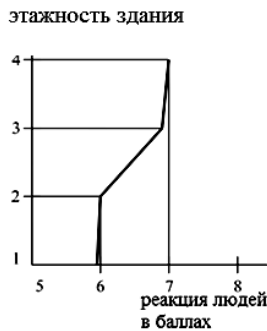


Рис. 2. Оценка в баллах поэтажной реакции людей в здании при Газлийском землетрясении ( $T_{\text{соб. кол}} = 0,18$  с), г. Бухара, 4-этажное крупнопанельное здание — общежитие



Рис. 3. Оценка в баллах поэтажной реакции людей в здании при землетрясении ( $T_{\text{соб. кол}} = 0,18$  с), г. Кайраккум, 4-этажное крупнопанельное жилое здание



Рис. 4. Оценка в баллах поэтажной реакции людей в здании при Газлийском землетрясении ( $T_{\text{соб. кол}} = 0,25$  с), г. Самарканд, 3-этажное каркасное здание казармы (курсанты)

Для строителей большой интерес должны представлять выявленные членами комиссии особенности поведения людей в зальных помещениях кинотеатров при Кишиневском землетрясении, так как в Федеральных законах и нормативных документах РФ они вообще не рассматриваются. Сегодня даже в высотных зданиях помещения с большим числом людей (примерно 50 и более человек) размещаются в верхних этажах, что противоречит особенностям их поведения при землетрясении. В табл. 3 приведена оценка интенсивности сейсмического воздействия на территориях 6 разных кинотеатров Молдавской республики при 6-балльном Кишиневском землетрясении от 30 мая 1990 г.

Оценка усредненной реакции людей в зальных помещениях 6 кинотеатров при землетрясении полностью подтвердила выводы ученых-медиков: усредненная реакция людей в этих зальных помещениях за счет «эффекта толпы» увеличилась примерно на 1,5 степени по сравнению с интенсивностью на поверхности земли. Поэтому интенсивность «реального» сейсмического воздействия в 6 баллов (см. в табл. 3 «проект») автор определял по данным рис. 1 с учетом расчетной усредненной реакции людей, равной примерно  $E = 4,0$ , и расчетного времени эвакуации из зальных помещений, равного примерно 80 с (вместо длительности участка сейсмического воздействия). Оценка по «проекту» в табл. 3 совпадает с оценкой интенсивности сейсмического

воздействия на территориях всех кинотеатров, сделанной разными специалистами (см. табл. 3). Для определения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) человека в зависимости от его позы при вибрационных воздействиях (выявление частоты, на которой в теле проявляется максимум силового воздействия), ученые [3] для упрощения его тело рассматривали как одномассовую динамическую систему. Согласно этим исследованиям [3], в теле стоящего человека максимальное горизонтальное вибрационное воздействие проявляется на частотах примерно 2,0...4,0 Гц (голова, плечо, пояс), а сидящего человека — на частоте 2 Гц (голова). Отсюда с большой вероятностью можно предположить, что в положении лежа (в ночное время суток) максимальное горизонтальное вибрационное воздействие будет проявляться на частотах менее 2 Гц. Эти данные позволяют сделать вывод, что значения периодов собственных колебаний зданий ( $T_{\text{соб}}$ ) высотой до 5 этажей, от которых зависит частота опасного для людей вибрационного воздействия горизонтального направления, должны быть  $T_{\text{соб}} \leq 0,20$  с. Поэтому вполне объяснимой выглядит минимальная поэтажная усредненная реакция людей в зданиях «жесткого» типа (см. рис. 2, 3) с периодами собственных колебаний  $T_{\text{соб}} < 0,20$  с при землетрясениях.

Таблица 3

*Оценка интенсивности сейсмического воздействия при Кишиневском землетрясении*

| Наименование<br>объекта<br>исследования | Оценка интенсивности землетрясения, балл |                                                           |                                          |                                     |                                            |
|-----------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|
|                                         | по форму-<br>ле Шеба-<br>лина            | по степени<br>реакции кон-<br>струкций зда-<br>ний MSK-64 | по степени<br>реакции<br>людей<br>MSK-64 | по данным<br>ученых-<br>сейсмологов | по степени<br>реакции<br>людей<br>«проект» |
| Кинотеатр<br>«Искра»                    | 5,5                                      | 6,0                                                       | 7,5                                      | 6,0                                 | 6,0                                        |
| «Патрия»                                | 5,5                                      | 6,0                                                       | 7,5                                      | 6,0                                 | 6,0                                        |
| «Москва»                                | 5,5                                      | 6,0                                                       | 7,5                                      | 6,0                                 | 6,0                                        |
| им. Горького                            | 5,4                                      | 6,0                                                       | 7,5                                      | 6,0                                 | 6,0                                        |
| «Россия»                                | 5,5                                      | 6,0                                                       | 7,5                                      | 6,0                                 | 6,0                                        |
| «Единцы»                                | 5,5                                      | 6,0                                                       | 7,5                                      | 6,0                                 | 6,0                                        |

В заключении несколько слов об основных причинах эмоциональной напряженности людей до землетрясения, которая может значительно повлиять на реакцию людей в зданиях при сейсмических воздействиях. Природа наделила человека надежным инстинктом самосохранения, который при угрозе жизни мобилизует все его возможности для немедленного выхода из опасной ситуации. Однако влиять на инстинкт самосохранения у людей в момент землетрясения может и заложенная в их сознании информация о катастрофических последствиях при прошедших стихийных бедствиях на территории нашей страны. Кроме того, для жителей многих городов России не является секретом низкое качество эксплуатации многих зданий, сведения о разрушениях зданий даже без участия внешних силовых воздействий, новых зданиях со значительными повреждениями и т. д. К тому же многие люди в сейсмоопасных районах России помнят еще и о том, что интенсивность ряда прошедших землетрясений была на 1—2 балла больше расчетной зданий, что

послужило причиной гибели многих тысяч людей. Подобная «отрицательная» информация успешно дополняется положениями Федеральных законов и нормативных документов РФ о том, что здания, с одной стороны, рассчитываются не на самое максимальное землетрясение, а, с другой стороны, в их расчетах не учитываются воздействия первых повторных сильных толчков, которые могут быть причиной разрушения зданий и гибели людей.

При использовании данных ученых-медиков автор разработал метод определения потерь здоровья людей (боеспособности личного состава войск) в зданиях с различными объемно-планировочными и конструктивными решениями при землетрясениях с различной интенсивностью и длительностью участка сейсмического воздействия. Этот метод позволяет за счет применения рациональных объемно-планировочных и конструктивных решений зданий сохранить здоровье примерно у 30 % людей при землетрясении.

#### *Выводы:*

1. Усредненная реакция людей в зданиях при землетрясении зависит от интенсивности и длительности участка сейсмического воздействия (времени эвакуации из зальных помещений).

2. В зданиях «жесткого» типа (панельные, кирпичные) усредненная поэтажная реакция людей в зданиях до 5 этажей при Газлийском, Кайраккумском землетрясениях увеличилась на один балл с третьего этажа. Выявленная динамика увеличения реальной поэтажной усредненной реакции людей в зданиях «жесткого» типа (см. рис. 2, 3) примерно соответствует изменению расчетной поэтажной усредненной реакции людей в панельных зданиях с периодами  $T \leq 0,20$  с (см. табл. 1).

3. В здании «гибкого» типа (каркасное здание казармы курсантов в г. Самарканде) при Газлийском землетрясении усредненная поэтажная реакция курсантов увеличилась на один балл со второго этажа. Выявленная динамика увеличения поэтажной реальной реакции курсантов в здании «гибкого» типа (см. рис. 4) примерно соответствует изменению расчетной поэтажной реакции людей в каркасных зданиях с периодами  $T \leq 0,25$  с (см. табл. 2).

4. Динамика увеличения реальной усредненной реакции людей в зданиях разного типа при землетрясениях согласуется с выводами ученых [3] о том, что максимальное вибрационное горизонтальное воздействие на теле человека проявляется в основном на частотах примерно от 2 до 4 Гц.

5. За счет применения рациональных объемно-планировочных и конструктивных решений зданий можно сохранить здоровье примерно у 30 % людей при землетрясении.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ананьин И. В., Аптикаев Ф. Ф., Эртелева О. О. Люди как объект шкалы сейсмической интенсивности // РАН. Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта. Исследования по сейсмоtectонике и современной геодинамике. 2006. С. 18—20.
2. Масляев А. В. Вибрационное воздействие конструкций зданий на людей при землетрясении // Жилищное стр-во. 2007. № 12. С. 23—24.
3. Аруин А. С., Зацюрский В. М. Эргономическая биомеханика. М., 1989.
4. Смирнов В. И. Сейсмоизоляция — современная сейсмозащита зданий в России // Сейсмостойкое стр-во. Безопасность сооружений. 2013. № 4. С. 40—53.
5. Еришов И. А., Шебалин Н. В. Проблема конструкции шкалы интенсивности землетрясений с позиции сейсмологов // Прогноз сейсмических воздействий. Вопр. инж. сейсмологии : Сб. науч. тр. М., 1984. Вып. 25. С. 78—95.

6. Александровский Ю. А. Психогенные реакции и расстройства, возникающие в экстремальных условиях при стихийных бедствиях, катастрофах и во время войны // Психология экстремальных ситуаций : Хрестоматия. Минск, 1999. С. 165—187.

7. Медведев С. В., Шпонхойер В., Карник С. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М., 1965.

8. Масляев В. Н. Воздействие колебаний конструкций зданий при землетрясениях на реакцию людей // Экспресс-информ. ВНИИИС Госстроя СССР. Сер. 14: Сейсмостойкое стр-во. 1987. Вып. 6. С. 18—21.

1. Anan'in I. V., Aptikaev F. F., Erteleva O. O. Lyudi kak ob"ekt shkaly seysmicheskoy intensivnosti // RAN. In-t fiziki Zemli im. O. Yu. Shmidta. Issledovaniya po seysmotektonike i sovremennoy geodinamike. 2006. S. 18—20.

2. Maslyayev A. V. Vibratsionnoye vozdeystvie konstruktsiy zdaniy na lyudey pri zemletryaseniі // Zhilishchnoe str-vo. 2007. № 12. С. 23—24.

3. Aruin A. S., Zatsiorskiy V. M. Ergonomicheskaya biomekhanika. М., 1989.

4. Smirnov V. I. Seismoizolyatsiya — sovremennaya seysmozashchita zdaniy v Rossii // Seysmostoykoe str-vo. Bezopasnost' sooruzheniy. 2013. № 4. S. 40—53.

5. Ershov I. A., Shebalin N. V. Problema konstruktssii shkaly intensivnosti zemletryaseniy s pozitsii seysmologov // Prognoz seysmicheskikh vozdeystviy. Vopr. inzh. seysmologii : Sb. nauch. tr. М., 1984. Vyp. 25. S. 78—95.

6. Aleksandrovskiy Yu. A. Psikhogennyye reaktsii i rasstroystva, voznikayushchie v ekstremal'nykh usloviyakh pri stikhiyных bedstviyakh, katastrofakh i vo vremya voyny // Psikhologiya ekstremal'nykh situatsiy : Khrestomatiya. Minsk, 1999. S. 165—187.

7. Medvedev S. V., Shponkhoyev V., Karnik S. Shkala seysmicheskoy intensivnosti MSK-64. М., 1965.

8. Maslyayev V. N. Vozdeystvie kolebaniy konstruktsiy zdaniy pri zemletryaseniyakh na reaktsiyu lyudey // Ekspress-inform. VNIIS Gosstroya SSSR. Ser. 14: Seysmostoykoe str-vo. 1987. Vyp. 6. S. 18—21.

© Масляев А. В., 2014

Поступила в редакцию  
в декабре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Масляев А. В. Защита жизнедеятельности населения России в зданиях при землетрясении // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 70—78.

УДК 692.115

**Д. П. Медведев, А. В. Захаров**

## **ПОСТРОЕНИЕ УРАВНЕНИЯ РЕГРЕССИИ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ОТ ПЛОТНОСТИ И ВЛАЖНОСТИ**

Приведены результаты лабораторного определения теплопроводности песчаного грунта разной плотности и влажности. Рассмотрены методика и получение уравнения регрессии второго порядка зависимости теплопроводности от влажности и плотности грунта.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** теплопроводность, плотность, влажность, уравнение регрессии.

This article presents the results of laboratory determination of thermal conductivity of sandy soil with different density and humidity. The method of development of regression equation of the second order thermal conductivity dependence on soil moisture and density is described.

**Key words:** thermal conductivity, density, moisture, regression equation.

В современном мире все большее и большее распространение находят альтернативные возобновляемые источники тепловой энергии. Одно из перспективных направлений — применение тепловых грунтовых насосов, предназначенных для получения геотермальной энергии для обогрева здания в зимнее время и для сброса тепловой энергии в процессе кондиционирования здания в летнее время [1, 2]. Для обоснованного использования грунтового основания в данных целях необходимо знать теплотехнические характеристики, в частности теплопроводности и теплоемкости.

Для оценки возможности получения геотермальной энергии достаточно рассчитанных значений теплотехнических характеристик. В зарубежной практике существует целый ряд методов расчета теплотехнических характеристик в зависимости от физических характеристик грунтового основания [3—5]. В отечественной же литературе и нормативных документах таковых не приводится или же они применимы для узкого спектра мерзлых грунтов. Таким образом, для оценки возможности использования грунтового основания в качестве теплового коллектора необходимы специфические исследования, что замедляет внедрение данной технологии.

Поскольку наибольшее влияние на эффективность использования грунтового основания в качестве теплового коллектора оказывает теплопроводность, целью проводимых исследований было получение зависимости теплопроводности грунта от его физических свойств — влажности и плотности. Для достижения данной цели проведена серия экспериментов. В качестве входных варьируемых параметров приняты влажность и плотность грунта, выходного параметра — теплопроводность.

Для получения зависимости планируется использовать квадратичное уравнение. В этом случае при проведении эксперимента необходимо варьировать исходные параметры как минимум на трех уровнях. В ходе эксперимента была использована методика нормального уплотнения по ГОСТ 22733—2002 «Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности» и СН 449-72 «Указания по проектированию земляного полотна железных и автомобильных дорог». В ходе испытаний использовался

песок мелкий с начальной влажностью  $\omega = 0,0$  с увеличением влажности с шагом около 4 % и количеством ударов уплотнения 25, 15 и 5 для варьирования плотности.

Кроме того, для учета зависимости плотности от влажности сформировано уравнение регрессии зависимости плотности от влажности и количества ударов уплотнения.

Полученные данные сведены в табл. 1, 2 и 3 для 25, 15 и 5 ударов уплотнения соответственно.

Таблица 1

Результаты эксперимента при 25 ударах уплотнения

| Плотность, г/см <sup>3</sup> |          |          |              | Влажность, % |            |            |                | Теплопроводность, Вт/(м·К) |             |             |                 |
|------------------------------|----------|----------|--------------|--------------|------------|------------|----------------|----------------------------|-------------|-------------|-----------------|
| $\rho_1$                     | $\rho_2$ | $\rho_3$ | $\bar{\rho}$ | $\omega_1$   | $\omega_2$ | $\omega_3$ | $\bar{\omega}$ | $\lambda_1$                | $\lambda_2$ | $\lambda_3$ | $\bar{\lambda}$ |
| 1,71                         | 1,70     | 1,69     | 1,70         | 0            | 0          | 0          | 0              | 0,347                      | 0,331       | 0,33        | 0,336           |
| 1,73                         | 1,74     | 1,75     | 1,74         | 3,48         | 3,85       | 3,66       | 3,66           | 1,89                       | 1,76        | 1,82        | 1,821           |
| 1,80                         | 1,82     | 1,83     | 1,82         | 7,69         | 7,95       | 7,80       | 7,82           | 2,70                       | 2,79        | 2,83        | 2,774           |
| 1,85                         | 1,87     | 1,87     | 1,86         | 10,19        | 10,47      | 10,22      | 10,3           | 2,95                       | 2,94        | 2,88        | 2,924           |
| 1,95                         | 1,93     | 1,91     | 1,93         | 13,19        | 13,10      | 13,15      | 13,1           | 3,04                       | 3,03        | 3,13        | 3,065           |
| 1,90                         | 1,88     | 1,86     | 1,88         | 16,14        | 16,12      | 16,14      | 16,1           | 2,90                       | 2,79        | 2,88        | 2,854           |

Таблица 2

Результаты эксперимента при 15 ударах уплотнения

| Плотность, г/см <sup>3</sup> |          |          |              | Влажность, % |            |            |                | Теплопроводность, Вт/(м·К) |             |             |                 |
|------------------------------|----------|----------|--------------|--------------|------------|------------|----------------|----------------------------|-------------|-------------|-----------------|
| $\rho_1$                     | $\rho_2$ | $\rho_3$ | $\bar{\rho}$ | $\omega_1$   | $\omega_2$ | $\omega_3$ | $\bar{\omega}$ | $\lambda_1$                | $\lambda_2$ | $\lambda_3$ | $\bar{\lambda}$ |
| 1,70                         | 1,69     | 1,68     | 1,69         | 0            | 0          | 0          | 0              | 0,338                      | 0,327       | 0,325       | 0,330           |
| 1,75                         | 1,73     | 1,71     | 1,73         | 3,89         | 4,09       | 4,10       | 4,03           | 1,832                      | 1,845       | 1,861       | 1,846           |
| 1,83                         | 1,81     | 1,79     | 1,81         | 8,87         | 9,11       | 9,19       | 9,05           | 2,532                      | 2,59        | 2,555       | 2,559           |
| 1,88                         | 1,86     | 1,84     | 1,86         | 11,94        | 11,83      | 11,69      | 11,8           | 2,733                      | 2,77        | 2,777       | 2,760           |
| 1,94                         | 1,92     | 1,90     | 1,92         | 16,21        | 15,60      | 15,01      | 15,6           | 2,868                      | 2,858       | 2,847       | 2,858           |
| 1,90                         | 1,89     | 1,87     | 1,89         | 16,86        | 17,29      | 16,99      | 17,04          | 2,752                      | 2,776       | 2,766       | 2,765           |

Таблица 3

Результаты эксперимента при 5 ударах уплотнения

| Плотность, г/см <sup>3</sup> |          |          |              | Влажность, % |            |            |                | Теплопроводность, Вт/(м·К) |             |             |                 |
|------------------------------|----------|----------|--------------|--------------|------------|------------|----------------|----------------------------|-------------|-------------|-----------------|
| $\rho_1$                     | $\rho_2$ | $\rho_3$ | $\bar{\rho}$ | $\omega_1$   | $\omega_2$ | $\omega_3$ | $\bar{\omega}$ | $\lambda_1$                | $\lambda_2$ | $\lambda_3$ | $\bar{\lambda}$ |
| 1,65                         | 1,66     | 1,68     | 1,665        | 0            | 0          | 0          | 0              | 0,291                      | 0,324       | 0,307       | 0,307           |
| 1,70                         | 1,69     | 1,67     | 1,688        | 3,45         | 3,49       | 3,48       | 3,4            | 1,44                       | 1,54        | 1,31        | 1,43            |
| 1,71                         | 1,72     | 1,73     | 1,721        | 7,06         | 7,04       | 7,02       | 7,04           | 2,31                       | 2,32        | 2,45        | 2,36            |
| 1,82                         | 1,80     | 1,79     | 1,804        | 10,42        | 10,55      | 10,63      | 10,5           | 2,81                       | 2,66        | 2,72        | 2,73            |
| 1,83                         | 1,85     | 1,87     | 1,848        | 12,04        | 12,01      | 11,99      | 12             | 2,92                       | 2,93        | 2,88        | 2,91            |
| 1,88                         | 1,89     | 1,90     | 1,892        | 16,25        | 15,76      | 15,72      | 15,9           | 2,93                       | 2,74        | 2,89        | 2,85            |
| 1,86                         | 1,85     | 1,83     | 1,849        | 18,76        | 18,16      | 18,15      | 18,3           | 2,72                       | 2,80        | 2,87        | 2,80            |

Для получения зависимости теплопроводности от влажности и плотности планируется использовать квадратичное уравнение регрессии вида

$$y = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{12} x_1 x_2, \quad (1)$$



где  $x_0$  — свободный член,  $x_0 = 1$ ;  $x_1$  — плотность грунта;  $x_2$  — влажность грунта;  $b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{22}, b_{12}$  — коэффициенты уравнения регрессии.

Кроме того, квадратичное уравнение регрессии используется и для зависимости плотности от количества ударов уплотнения:

$$c = c_0 r_0 + c_3 r_1 + c_2 x_2 + c_{11} r_1^2 + c_{22} x_2^2 + c_{32} r_1 x_2, \quad (2)$$

где  $r_0$  — свободный член,  $r_0 = 1$ ;  $r_1$  — количество ударов уплотнения;  $x_2$  — влажность грунта;  $c_0, c_3, c_2, c_{11}, c_{22}, c_{32}$  — коэффициенты уравнения регрессии.

При построении уравнений регрессии используется метод, основанный на минимизации суммы квадратов отклонений. Составляется уравнение, характеризующее значение квадрата разницы между экспериментальным и теоретическим значением исследуемого параметра. В этом уравнении в качестве неизвестных выступают неизвестные параметры уравнения регрессии.

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^{\text{exp}})^2, \quad (3)$$

где  $S$  — сумма квадратов отклонений;  $y_i$  — теоретическое значение исследуемого параметра;  $y_i^{\text{exp}}$  — экспериментальное значение исследуемого параметра.

Необходимым условием экстремума функции нескольких переменных является равенство нулю частных производных по неизвестным коэффициентам. Используя это условие, получаем систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно неизвестных коэффициентов  $b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{22}, b_{12}$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial b_0} &= 0; \\ \frac{\partial S}{\partial b_1} &= 0; \\ \frac{\partial S}{\partial b_2} &= 0; \\ \frac{\partial S}{\partial b_{11}} &= 0; \\ \frac{\partial S}{\partial b_{22}} &= 0; \\ \frac{\partial S}{\partial b_{12}} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Решая данную систему, получаем следующее уравнение регрессии:

$$\rho = 1,618 + 5,21 \cdot 10^{-3} r_1 + 1,89 \cdot 10^{-2} \omega - 8,08 \cdot 10^{-5} r_1^2 - 3,12 \cdot 10^{-4} \omega^2 - 1,62 \cdot 10^{-5} r_1 \omega. \quad (5)$$

Для проверки полученной регрессии на адекватность необходимо проверить критерий Фишера. Теоретическое значение критерия Фишера  $F_{\text{теор}} = 2,4208$ , опытное —  $F_{\text{оп}} = 2,343$ , что позволяет сделать вывод об адекватности модели.

Таким образом, получено уравнение регрессии для плотности в зависимости от количества ударов уплотнения. На рис. 1—3 показаны графики зависимости плотности от влажности при постоянном количестве ударов уплотнения.

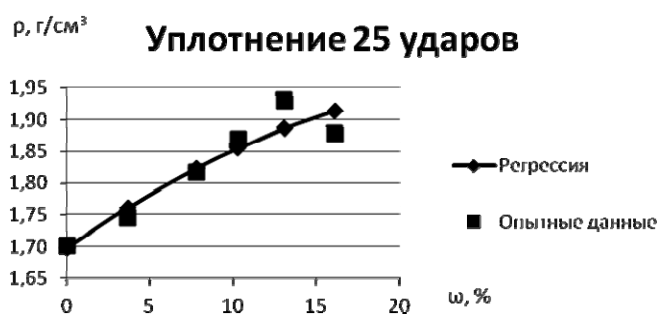


Рис. 1. Зависимость плотности от влажности при 25 ударах уплотнения



Рис. 2. Зависимость плотности от влажности при 15 ударах уплотнения

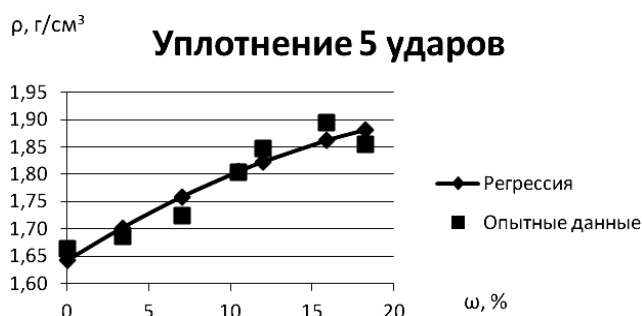


Рис. 3. Зависимость плотности от влажности при 5 ударах уплотнения

Таким образом, из графиков видно, что полученное уравнение регрессии не учитывает снижение плотности после превышения значения оптимальной влажности. Для целей нашего эксперимента это не критично. Таким образом, построение уравнения регрессии для теплопроводности выполняется с вычисленной по полученному уравнению плотностью.

Поскольку значение теплопроводности при нулевой влажности значительно меньше значения при влажности уже в 4 %, принято решение исключить их из построения уравнения.

В результате решения системы линейных алгебраических уравнений вида (4), построенных для теплопроводности, получим следующее уравнение регрессии:

$$\lambda = 274,03 - 331,48\rho + 5,36\omega + 100,4\rho^2 + 0,01\omega^2 - 3,03\rho\omega. \quad (6)$$

Для данного уравнения теоретическое значение критерия Фишера  $F_{\text{теор}} = 2,18$ , опытное —  $F_{\text{оп}} = 2,1712$ , что позволяет судить об адекватности полученной модели.

По полученному уравнению регрессии строится номограмма зависимости теплопроводности от плотности и влажности, которая приведена на рис. 4.

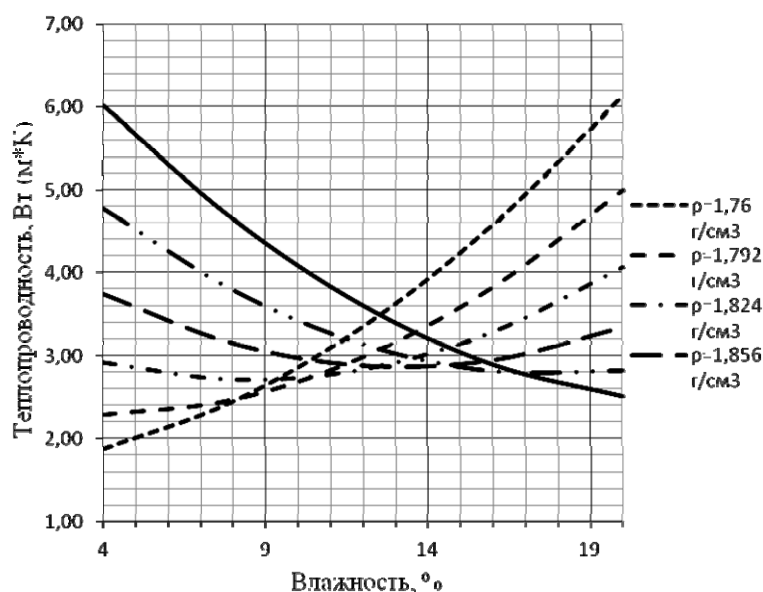


Рис. 4. Номограмма зависимости теплопроводности от плотности и влажности

Следует отметить, что номограмма, представленная на рис. 4, справедлива только для песчаного грунта, близкого тому, который использовался во время лабораторных исследований. По номограмме видно, что в менее плотном грунте ( $\rho = 1,76 \text{ г/см}^3$ ) теплопроводность обеспечивается в основном за счет поровой воды и при увеличении влажности теплопроводность значительно увеличивается (теоретически до  $6 \text{ Вт/(м·К)}$ ). В более плотном грунте ( $\rho = 1,92 \text{ г/см}^3$ ) наблюдается обратная картина: теплопроводность обеспечивается за счет плотного контакта между частицами грунта и увеличение влажности снижает теплопроводность.

Таким образом, получено уравнение регрессии зависимости теплопроводности от плотности и влажности для песчаного грунта. В дальнейших исследованиях полученные данные будут использованы для оценки зарубежных методик расчета теплопроводности применительно к грунтам Пермского края.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бобров И. А., Калошина С. В., Захаров А. В. Применение тепловой энергии грунтового основания для отопления и кондиционирования зданий // Вестник ПГТУ. Строительство и архитектура. 2011. № 1. С. 10—14.
2. Пономарев А. Б., Захаров А. В. Использование геотермальной энергии для отопления и кондиционирования зданий // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2010. № 17(36). С. 119—122.
3. Usowicz Boguslaw, Usowicz Lukasz. Thermal conductivity of soils — comparison of experimental results and estimation methods // Eurosoil 2004 Congress. Freiburg 2004. 10 pp.
4. The Effect of Soil Thermal Conductivity Parameterization on Surface Energy Fluxes and Temperatures / C. D. Peters-Lidard, E. Blackburn, X. Liang and E. F. Wood // Journal of the Atmospheric Sciences. Vol. 55, Issue 7 April 1998. Pp. 1209—1224.
5. An Improved Model for Predicting Soil Thermal Conductivity from Water Content at Room Temperature / Sen Lu, Tusheng Ren\* and Yuanshi Gong, Robert Horton // Soil Science Society of America. Vol. 71. Pp. 8—14 (2007).
1. Bobrov I. A., Kaloshina S. V., Zakharov A. V. Primenenie teplovoy energii gruntovogo osnovaniya dlya otopeniya i konditsionirovaniya zdaniy // Vestnik PGU. Stroitel'stvo i arkhitektura. 2011. № 1. S. 10—14.
2. Ponomarev A. B., Zakharov A. V. Ispol'zovanie geotermal'noy energii dlya otopeniya i konditsionirovaniya zdaniy // Vestnik Volgogr. gos. arkhит.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhит. 2010. № 17(36). S. 119—122.
3. Usowicz Boguslaw, Usowicz Lukasz. Thermal conductivity of soils — comparison of experimental results and estimation methods // Eurosoil 2004 Congress. Freiburg 2004. 10 pp.
4. The Effect of Soil Thermal Conductivity Parameterization on Surface Energy Fluxes and Temperatures / C. D. Peters-Lidard, E. Blackburn, X. Liang and E. F. Wood // Journal of the Atmospheric Sciences. Vol. 55, Issue 7 April 1998. Pp. 1209—1224.
5. An Improved Model for Predicting Soil Thermal Conductivity from Water Content at Room Temperature / Sen Lu, Tusheng Ren\* and Yuanshi Gong, Robert Horton // Soil Science Society of America. Vol. 71. Pp. 8—14 (2007).

© Медведев Д. П., Захаров А. В., 2014

Поступила в редакцию  
в декабре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Медведев Д. П., Захаров А. В. Построение уравнения регрессии зависимости теплопроводности от плотности и влажности // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 79—84.

УДК 624.072.2

**В. А. Пшеничкина, К. Н. Сухина**

# **МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПОДСТРОПИЛЬНЫХ ФЕРМ ОСНОВНОГО КОРПУСА Р-1 ОАО «ВОЛТАЙР-ПРОМ»**

Приведены результаты экспериментальных исследований несущих конструкций. Дана оценка остаточного ресурса и определен оптимальный срок службы подстропильных ферм.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** подстропильные фермы, остаточный ресурс, плотность вероятности, характеристика безопасности.

The results of experimental study of bearing constructions are presented. The estimation of residual resource is given and optimum service life of secondary trusses is defined.

**К e y w o r d s:** secondary trusses; residual resource; probability density; safety features.

Отсутствие достоверной статистической информации о действительной работе конструкций и условиях их эксплуатации весьма серьезно сдерживает внедрение перспективного подхода к оценке и прогнозированию безотказности эксплуатируемых конструкций действующих промышленных предприятий.

Здания и сооружения во время эксплуатации подвергаются многочисленным природным, силовым и технологическим воздействиям, что приводит к изменениям физико-механических свойств строительных материалов, появлению различных дефектов и повреждений строительных конструкций, обуславливающих их физический износ. Физический износ можно рассматривать как относительно медленный, необратимый процесс возникновения, развития и накопления в конструкции повреждений, имеющих случайную величину и следующих через случайные интервалы времени. По мере накопления повреждений и по истечении некоторого срока эксплуатации, физический износ конструкции начинает проявляться во внешне выраженных признаках. Поэтому при обнаружении таких признаков, возникает необходимость определения опасности тех изменений, которые произошли с конструкцией за истекший период эксплуатации, т. е. появляется задача оценки технического состояния и определение максимально возможного срока службы конструкций и всего здания в целом в конкретных условиях эксплуатации (остаточный ресурс). Такая оценка может быть выполнена только на основе анализа результатов специального натурного обследования эксплуатируемых несущих конструкций зданий и сооружений.

Так, несущие железобетонные конструкции промышленного цеха ОАО «Волтайр» (стропильные, подстропильные фермы, ребристые плиты покрытия, колонны) в течение всего периода эксплуатации испытывают вибрацию, значительные температурные перепады, нагрев до 100...150 °С, что сопровождается выделением в воздушную среду углеводородов, воздействие химически агрессивной среды, переменное увлажнение и высушивание. Поэтому характерными внешне выраженными признаками физического износа эксплуатируемых железобетонных конструкций являются: значительные общие деформации, нарушающие условия нормальной эксплуатации; разрушение защитного слоя бетона с обнаженной арматурой каркаса; наличие коррозионных

повреждений арматуры; наличие трещин и разрывов рабочей арматуры; значительное превышение фактических нагрузок над расчетными. Все это приводит к значительному снижению несущей способности конструкций.

Конструктивно цех представляет собой каркасную систему, пролетом 18 м и шагом колонн 12 м. По проекту приняты бетон М 200 (для колонн и плит покрытия), бетон В 30 (для ферм), арматура АIII, Вр-I. Цех Р-1 был введен в эксплуатацию в 1964 г.

На первом этапе проводилась оценка несущей способности конструкций цеха на начало эксплуатации, что послужило отправной точкой на момент времени  $T = 0$ . На основании полученных данных был произведен расчет на безопасность, в результате которого было выявлено значение коэффициента безопасности исследуемых конструкций. Для железобетонных колонн он составил  $\beta = 6,3$ , для подстропильных ферм  $\beta = 5,2$  и для плит покрытия  $\beta = 5,2$ .

Повторное обследование проводилось в 1989 г., где на основании экспертной оценки было определено снижение прочностных параметров конструкций. В зависимости от технического состояния подстропильные фермы цеха были разделены на три категории. К I категории были отнесены фермы, чьи условия эксплуатации выполнялись согласно требованиям норм, а несущая способность соответствовала типовой серии и проекту и превышала эксплуатационные нагрузки. Данная категория характеризуется отсутствием внешних дефектов, влияющих на снижение несущей способности и эксплуатационной пригодности. II категория характеризуется снижением расчетного сопротивления бетона на 5 % и снижением расчетного сопротивления растянутой арматуры на 6 %. Для III категории снижение расчетных сопротивлений бетона и арматуры составляет 10 и 12 % соответственно. На основании этих исследований было установлено, что для ферм I категории  $\beta = 5,2$  осталось без изменений, для II категории  $\beta = 4,6$  и для III категории  $\beta = 4,2$ .

Третий этап обследования этих же конструкций проводился через 8 лет, в 1997 г. В результате испытаний конструкций неразрушающими методами было установлено, что произошло снижение несущей способности колонн на 20 % за счет коррозии рабочей арматуры и деструктивных повреждений бетона. Железобетонные плиты покрытия в результате длительного срока эксплуатации снизили свои эксплуатационные качества и получили повреждения в виде отслаиваний и отколов защитного слоя бетона, оголения и коррозии рабочей и конструктивной арматуры, также имеются участки интенсивного увлажнения атмосферными осадками из-за протечек кровельного покрытия. Часть плит не подлежали восстановлению и были заменены на новые. Характерными повреждениями подстропильных ферм являются продольные трещины в элементах нижнего пояса, оголение арматуры, коррозия рабочей арматуры. При пересчете всех категорий ферм была установлена минимальная характеристика безопасности  $\beta = 3,4$ .

Следующий этап обследования проводился в 2005 г. У ряда подстропильных ферм было определено снижение расчетных сопротивлений бетона и арматуры на 40 % с момента ввода в эксплуатацию. Таким образом, была получена еще одна величина характеристики безопасности  $\beta = 2,02$ .

На основании полученных экспертных данных, существующих нормативных документов, а также в результате расчетов с использованием методов теории надежности мы можем с достоверной точностью дать оценку остаточного ресурса эксплуатируемых конструкций.

В качестве примера рассмотрим построение функции надежности подстропильных ферм с наименьшей характеристикой безопасности  $\beta$ .

Все исследуемые подстропильные фермы были разделены на 27 видов (в зависимости от изменения их несущих конструкций по трем категориям во времени: изменения вида I-I-I, I-I-II, ..., II-II-II, ..., III-III-III). Рассматривая самый неблагоприятный вид изменения подстропильных ферм, получим график (рис. 1).

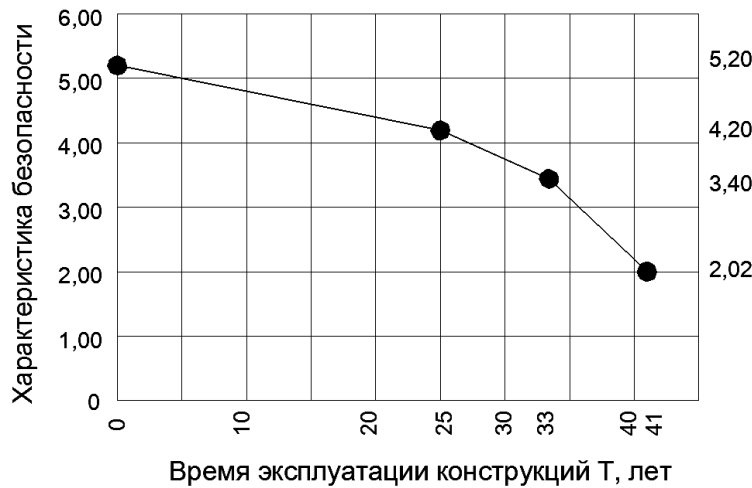


Рис. 1. График изменения характеристики безопасности  $\beta$  во времени  $t$

По методу наименьших квадратов можно определить, что изменение прочности идет по кубической зависимости и имеет следующий вид функции:

$$y(t) = -3,667 \cdot 10^{-4} x^3 - 0,241x^2 + 2,167x + 854,57. \quad (1)$$

Функция работоспособности имеет вид [1]

$$S(t) = R(t) - F(t). \quad (2)$$

Функция сопротивления  $R(t)$  и нагрузочный эффект  $F(t)$  являются нестационарными случайными процессами, статистические характеристики которых изменяются во времени.

Аппроксимируя эти величины, получим следующие выражения:

$$\begin{aligned} \tilde{R}(t) &= \tilde{R}_0 \varphi_R(t); \\ \tilde{F}(t) &= \tilde{F}_0 \varphi_F(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\tilde{R}_0$ ,  $\tilde{F}_0$  — случайные величины (математические ожидания) обобщенной прочности и обобщенной нагрузки на момент ввода в эксплуатацию;  $\varphi_R(t)$ ,  $\varphi_F(t)$  — детерминированные функции, которые были определены путем обследования конструкций.

Принимаем, что величины  $R(t)$  и  $F(t)$  изменяются по нормальному закону распределения. Тогда плотность вероятности времени безотказной работы системы имеет вид [2]

$$p(t) = \begin{cases} 0,5 - \Phi \left[ \frac{\xi(t) - 1}{A_R^2(t)\xi^2(t) + A_F^2(t)} \right], & t = 0; \\ \frac{A_R^2(t)\xi^2(t) + A_F^2(t)\xi'(t)}{\sqrt{2\pi} [A_R^2(t)\xi^2(t) + A_F^2(t)]^{3/2}} \exp \left[ -\frac{(\xi(t) + 1)^2}{2(A_R^2(t)\xi^2(t) + A_F^2(t))} \right], & 0 < t < \infty. \end{cases} \quad (4)$$

В формуле (4) были приняты следующие обозначения:

$\Phi \left[ \frac{\xi(t) - 1}{A_R^2(t)\xi^2(t) + A_F^2(t)} \right]$  — функция Лапласа;  $\xi(t) = \frac{m_R(t)}{m_F(t)}$  — обобщенный

коэффициент запаса;  $m_R(t)$ ,  $m_F(t)$  — математические ожидания;

$A_R(t) = \frac{\sigma_R(t)}{m_R(t)}$ ,  $A_F(t) = \frac{\sigma_F(t)}{m_F(t)}$  — коэффициенты вариации;  $\sigma_R(t)$ ,  $\sigma_F(t)$  —

стандарты;  $\xi'(t)$  — производная по времени функции  $\xi(t)$ .

Определив по формуле (4) плотность вероятности безотказной работы системы, получим график (рис. 2).

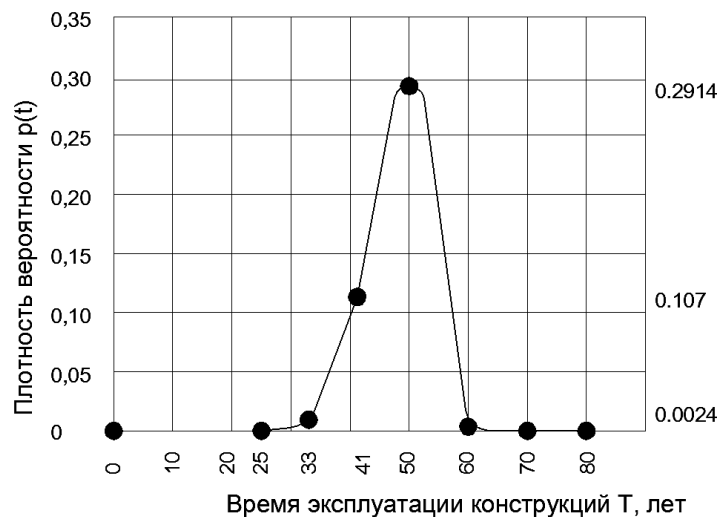


Рис. 2. График плотности вероятности времени безотказной работы системы

Используя функцию

$$\int_0^T p(t) dt = P_{res} \quad (5)$$

и приняв значение  $P_{res} = 10^{-3}$ , получим время безопасной эксплуатации подстропильных ферм. В результате расчета время  $t = 30$  лет. При  $P_{res} = 0,05$  время эксплуатации составляет  $t = 39$  лет.

Расчет показывает, что при  $t = 30$  лет коэффициент запаса равен  $\xi = 1$ , а при  $t = 39$  годам вероятность отказа уже не приемлема по критерию безопасности (I гр п.с.).



---

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пшеничкин А. П., Пшеничкина В. А.* Надежность зданий и оснований в особых условиях : учебное пособие. Волгоград : ВолгГАСУ, 2009. С. 31—48.

2. *Ржаницын А. Р.* Теория расчета строительных конструкций на надежность. М. : Стройиздат, 1978.

1. *Pshenichkin A. P., Pshenichkina V. A.* Nadezhnost' zdaniy i osnovaniy v osobykh usloviyakh : uchebnoe posobie. Volgograd : VolgGASU, 2009. S. 31—48.

2. *Rzhanitsyn A. R.* Teoriya rascheta stroitel'nykh konstruktsiy na nadezhnost'. M. : Stroyizdat, 1978.

© *Пшеничкина В. А., Сухина К. Н., 2014*

*Поступила в редакцию  
в ноябре 2013 г.*

*Ссылка для цитирования:*

*Пшеничкина В. А., Сухина К. Н.* Методика оценки остаточного ресурса подстропильных ферм основного корпуса Р-1 ОАО «Волтайр-пром» // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 85—89.

## **СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ**

УДК 692.23.699.86

**А. Ф. Жарков, О. Г. Чеснокова**

### **РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПАНЕЛИ АСС «ЭЛЕВИТ»**

Даны результаты расчета панели архитектурно-конструктивной системы «Элевит» на температурно-влажностные воздействия на протяжении одного года эксплуатации. Обобщен опыт рабочего проектирования.

**Ключевые слова:** конструктивная система «Элевит», архитектурно-конструктивное проектирование, теплотехнический расчет.

The authors provide the results of calculation for panels of architectural and structural systems “Elevit” for temperature and humidity influence within one year of operation. The experience of design engineering is summed up.

**Key words:** construction system “Elevit”; architectural and structural design; thermotechnical calculation.

Стационарные расчеты влажностного режима конструкций показывают большой запас надежности и не всегда отражают действительную картину поведения. В статье представлены результаты расчета многослойной стеновой панели архитектурно-строительной системы АСС «Элевит» (ТУ 5366-004-46023561-2003) [1] на температурно-влажностные воздействия на протяжении одного года эксплуатации. В расчете панели учитывали зависимость свойств материалов конструкции от температуры и влажности. Данная панель — один из элементов новой конструктивной системы, в основу которой заложены металлические стойки, металлоцекавитные балки, плиты и стеновые панели.

Для расчета использован программный комплекс WUFI Pro 5 [2] и климатические данные архива погоды в Волгограде за 2011 г. (метеостанция «Волгоград», измерения через каждые 3 часа) (рис. 1).

Выбрано для исследования рядовое поперечное сечение панели в зоне утеплителя [1]:

- 1-й (наружный) слой — цементно-стружечная плита — 10 мм;
- 2-й слой — утеплитель «Эковата» — 150 мм;
- 3-й слой ЦСП — 10 мм;
- 4-й (внутренний) отделочный слой ГКЛ — 10 мм.

Характеристики материалов в сухом состоянии и в зависимости от относительной влажности представлены в табл. 1 и 2.

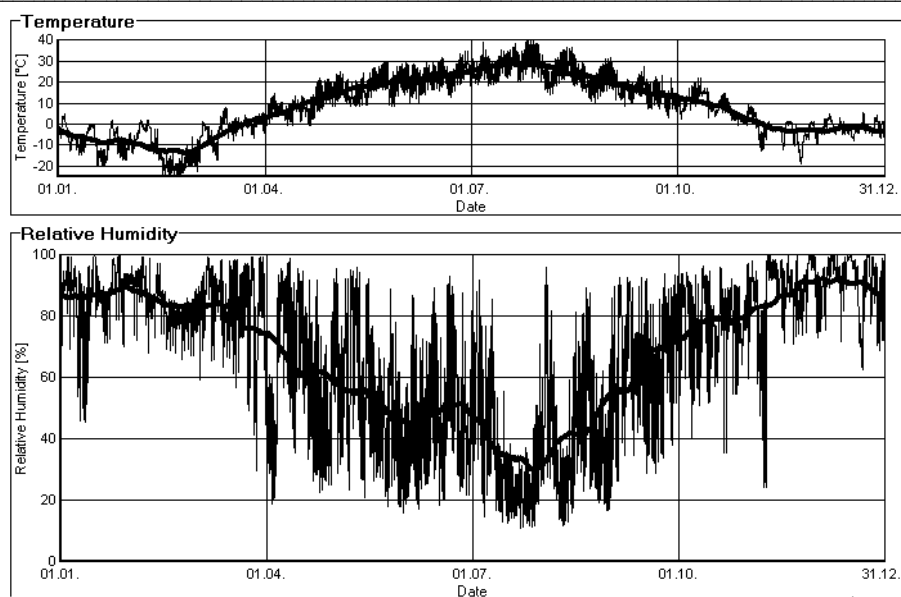


Рис. 1. Данные по температуре и относительной влажности за 2011 г. для Волгограда

Таблица 1

*Характеристики материалов в сухом состоянии*

| Характеристика               | Ед. изм                        | ЦСП   | ГКЛ   | «Эковата» |
|------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-----------|
| Плотность                    | кг/м <sup>3</sup>              | 1130  | 850   | 30        |
| Пористость                   | м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> | 0,48  | 0,65  | 0,99      |
| Теплоемкость                 | Дж/кгК                         | 840   | 870   | 1880      |
| Коэффициент теплопроводности | Вт/м°С                         | 0,255 | 0,163 | 0,036     |
| Паропроницаемость            | —                              | 28    | 6     | 1,86      |

Таблица 2

*Функция влагонакопления материалов, кг/м<sup>3</sup>,  
в зависимости от относительной влажности*

| Относительная влажность | ЦСП   | ГКЛ  | «Эковата» |
|-------------------------|-------|------|-----------|
| 0                       | 0     | 0    | 0         |
| 0,113                   | —     | 0,67 | —         |
| 0,328                   | —     | 2,01 | —         |
| 0,432                   | —     | 2,68 | —         |
| 0,504                   | —     | —    | 1,68      |
| 0,576                   | —     | 3,35 | —         |
| 0,722                   | —     | —    | 3,24      |
| 0,786                   | —     | 6,03 | —         |
| 0,8                     | 50    | —    | —         |
| 0,843                   | —     | 6,7  | —         |
| 0,881                   | —     | —    | 7,5       |
| 1                       | 143,5 | —    | 500       |

Механизм влагопереноса в капиллярно-пористых материалах рассматривается как явление диффузии и описывается дифференциальным уравнением

$$g_w = -D_w(w) \text{grad } W,$$

где  $g_w$  — плотность потока влагопереноса,  $\text{kg/m}^2\text{s}$ ;  $w$  — влажность материала,  $\text{kg/m}^3$ ;  $D_w$  — коэффициент влагопереноса (диффузия влаги),  $\text{m}^2/\text{s}$ .

Коэффициент диффузии для перераспределения влаги определен в соответствии с работой Круза [3]. Во многих случаях повышения  $D_{ws}$  с увеличением влажности могут быть приближенно описаны экспоненциальной функцией, которая для большинства минеральных строительных материалов охватывает диапазон от трех до десяти. В этих условиях существует приближенная зависимость между  $D_{ws}$  и значением коэффициента абсорбции  $A$  [3]:

$$D_{ws}(w) = 3,8(A/w_f)^2 1000^{(w/w_f)-1},$$

где  $D_{ws}$  — коэффициент диффузии всасывания влаги,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $A$  — коэффициент сорбционного водопоглощения,  $\text{kg/m}^2\sqrt{\text{s}}$ ;  $w$  — содержание влаги,  $\text{kg/m}^3$ ;  $w_f$  — полное свободное водонасыщение,  $\text{kg/m}^3$ .

Зависимость коэффициента диффузии влаги для используемых материалов от их влагосодержания представлена в табл. 3.

Таблица 3

*Зависимость коэффициента влагопереноса от влагосодержания*

| Название слоя | $W, \text{kg/m}^3$ | $D_{ws}, \text{m}^2/\text{s}$ |
|---------------|--------------------|-------------------------------|
| ЦСП           | 0                  | 0                             |
|               | 1,13               | 1,49E-11                      |
|               | 9,04               | 1,56E-10                      |
|               | 33,9               | 4,35E-10                      |
|               | 84,75              | 9,09E-10                      |
|               | 117,5              | 1,49E-09                      |
|               | 143,5              | 3,03E-09                      |
|               | 159,3              | 9,40E-09                      |
| ГКЛ           | 0                  | 0                             |
|               | 60,2               | 3,40E-08                      |
|               | 144,9              | 3,60E-08                      |
|               | 238,7              | 1,90E-07                      |
|               | 310,1              | 4,80E-07                      |

Зависимость коэффициентов теплопроводности материалов от температуры представлена в табл. 4.

Таблица 4

*Зависимость коэффициентов теплопроводности материалов от температуры*

| Температура наружного воздуха | ЦСП                             | «Эковата»                       | ГКЛ                             |
|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| $T, ^\circ\text{C}$           | $\lambda, \text{W/m}^2\text{C}$ | $\lambda, \text{W/m}^2\text{C}$ | $\lambda, \text{W/m}^2\text{C}$ |
| -20                           | 0,249                           | 0,034                           | 0,157                           |
| 80                            | 0,269                           | 0,054                           | 0,177                           |

Результаты расчета панели АСС «Элевит» (слой ЦСП — 10 мм; утеплитель «Эковата» 150 мм; слой ЦСП — 10 мм; слой ГКЛ — 10 мм) даны на рис. 2—12.

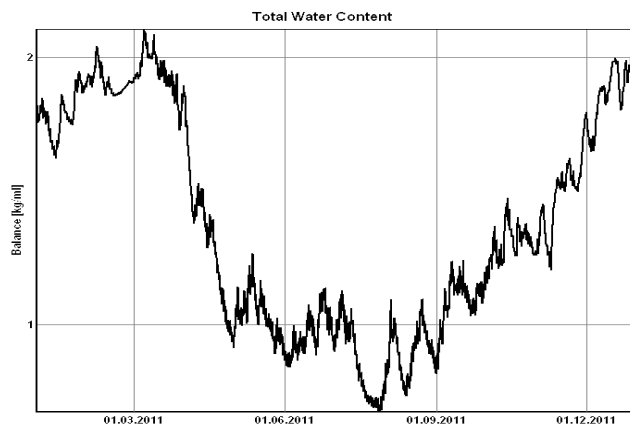


Рис. 2. Концентрация влаги,  $\text{кг/м}^3$ , в панели в течение года

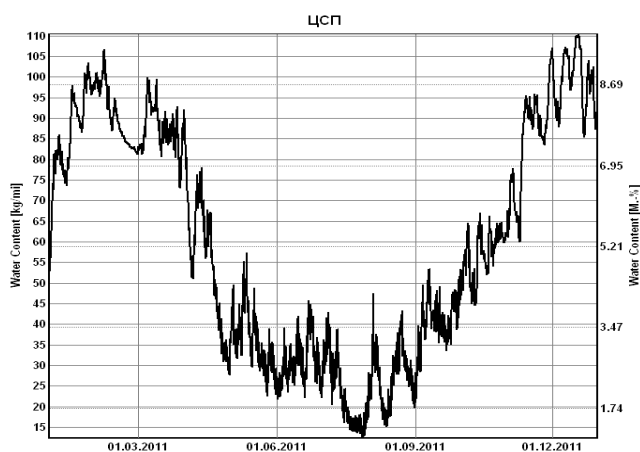


Рис. 3. Содержание воды,  $\text{кг/м}^3$ , во внешнем листе ЦСП (1-й слой) в течение года

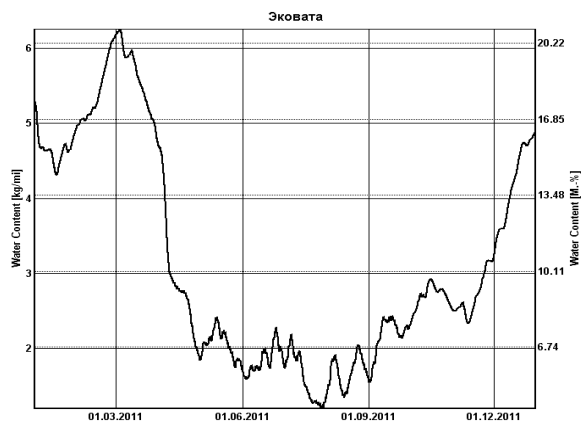


Рис. 4. Содержание воды,  $\text{кг/м}^3$ , внутри утеплителя (2-й слой) в течение года

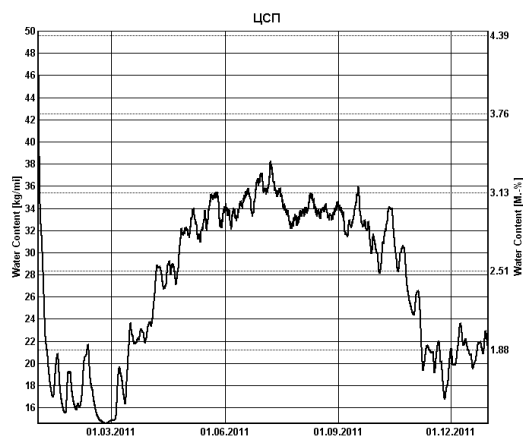


Рис. 5. Содержание воды,  $\text{кг/м}^3$ , во внутреннем листе ЦСП (3-й слой) в течение года

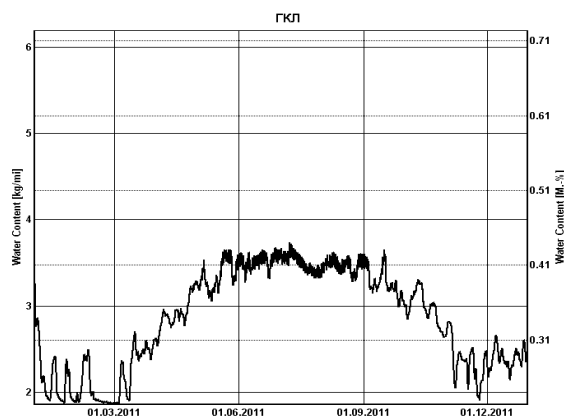


Рис. 6. Содержание воды,  $\text{кг/м}^3$ , во внутреннем отделочном листе из гипсокартона (4-й слой) в течение года

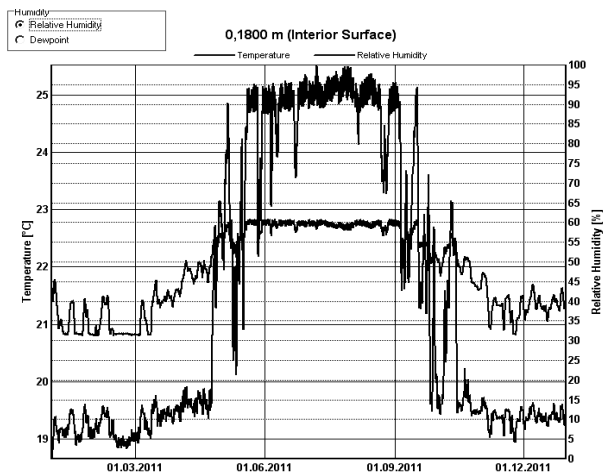


Рис. 7. Температура и относительная влажность на внутренней поверхности ограждающей конструкции

На графике (рис. 7) видно, что температура внутри помещения колеблется в течение года от 18 до 25,5 °С, а влажность — 30...60 %.

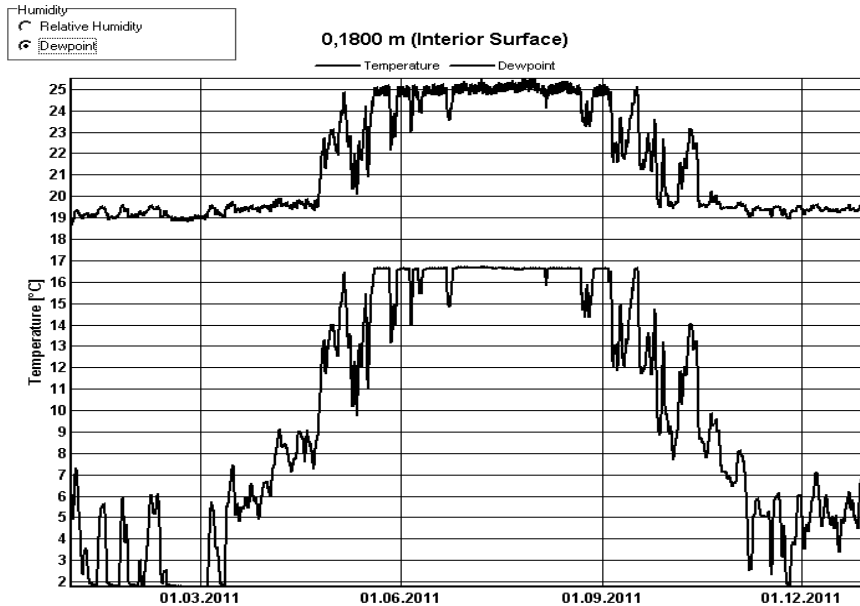


Рис. 8. Распределение температуры и точки росы на внутренней поверхности ограждающей конструкции

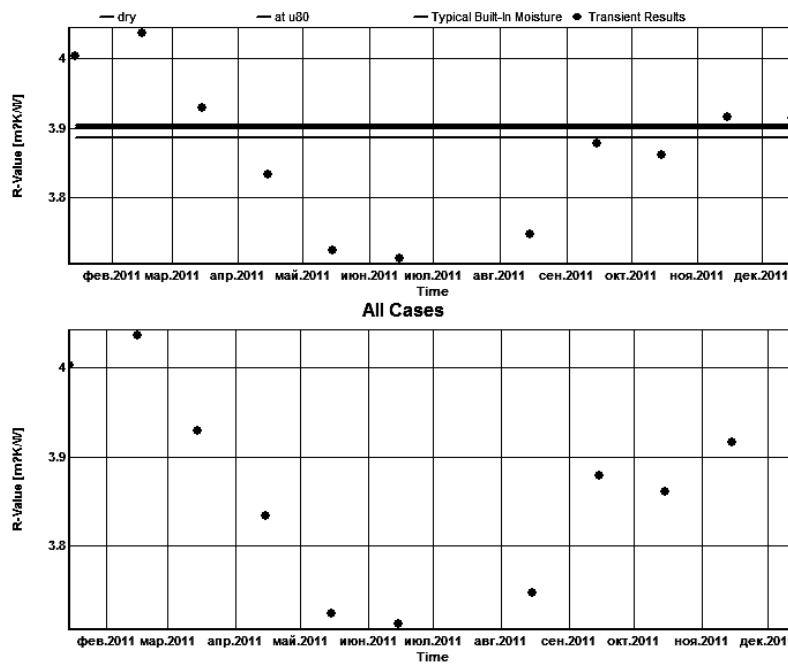


Рис. 9. Приведенное термическое сопротивление в зависимости от влажности воздуха по сечению панели с утеплителем: прямая толстая линия — без учета изменения влагосодержания; точками — с учетом влагосодержания материалов в процессе эксплуатации

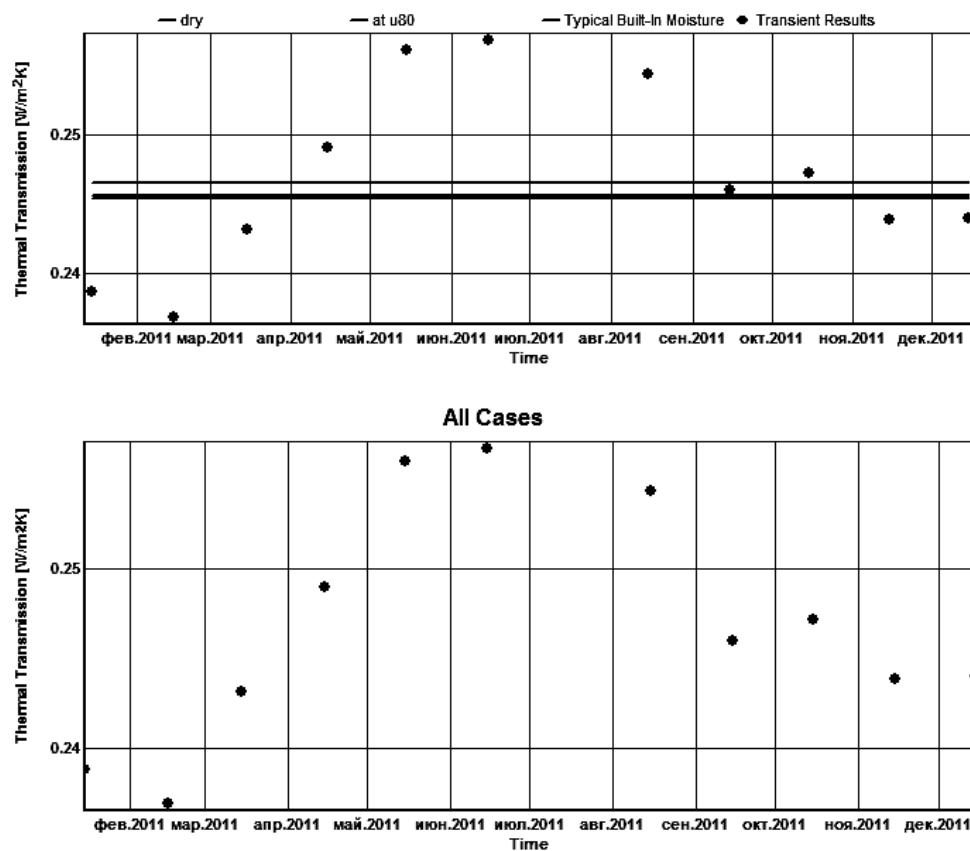


Рис. 10. Обратная величина приведенного термического сопротивления (мера скорости потери тепла в конструкции) в зависимости от влажности воздуха по сечению панели с утеплителем

График (рис. 11) показывает критическое содержание влаги в панели, приводящее к образованию грибка и плесени, и расчетное содержание влаги в рядовом сечении панели «Элевит».

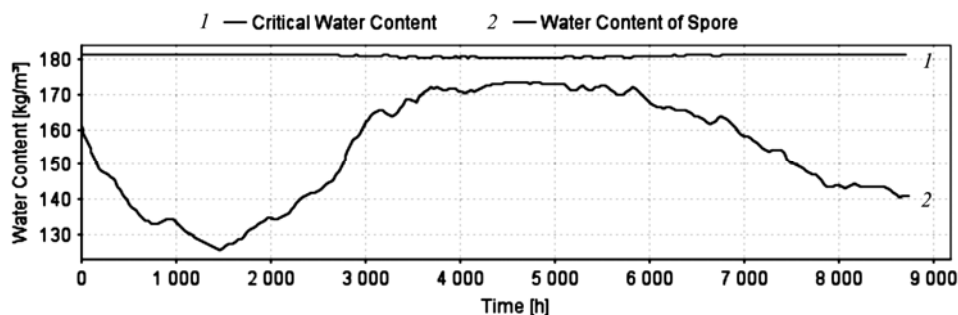


Рис. 11. Анализ содержания влаги в панели



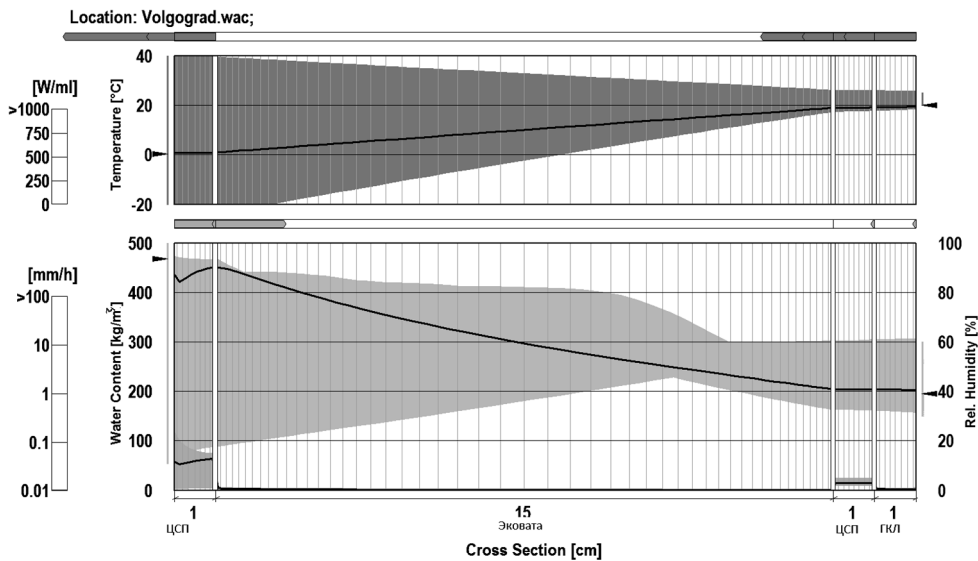


Рис. 12. Огибающая эпюра распределения температуры и влажности в слоях конструкции за период 2011 г.

Влагосодержание в конструктивных слоях и во всей панели за период эксплуатации представлены в табл. 5.

Таблица 5

*Влагосодержание в процентном содержании по массе, кг/м³*

| Слой материала         | В начале расчета |       | В конце расчета |       | Минимум |       | Максимум |        |
|------------------------|------------------|-------|-----------------|-------|---------|-------|----------|--------|
|                        | %                | кг/м³ | %               | кг/м³ | %       | кг/м³ | %        | кг/м³  |
| ЦСП                    | 4,34             | 50,00 | 7,82            | 93,30 | 0,80    | 12,32 | 9,56     | 107,25 |
| Эковата                | 17               | 5,33  | 14,15           | 5,25  | 2,00    | 1,19  | 20,50    | 8,73   |
| ЦСП                    | 4,34             | 50,00 | 1,88            | 21,74 | 0,10    | 14,48 | 4,34     | 50,00  |
| ГКЛ                    | 0,71             | 6,19  | 0,31            | 2,44  | 0,10    | 1,86  | 0,71     | 6,19   |
| Общее влаго-содержание | —                | 1,86  | —               | 1,96  | —       | 0,67  | —        | 2,50   |

За расчетный период в течение года во внутреннем листе ЦСП влагосодержание через год уменьшилось от 50 до 21,74 кг/м³. При этом минимальное значение достигало 14,48 кг/м³. Во внутреннем листе из ГКЛ влагосодержание уменьшилось с 6,9 до 2,44 кг/м³, при этом минимальное значение составило 1,86 кг/м³, или 0,1 % по массе (см. рис. 6).

Особенно следует отметить, что приведенное термическое сопротивление в зависимости от влажности воздуха по сечению с утеплителем сезонно изменяется. В сухом состоянии оно составляет 3,9 м²С/Вт и может достигать 4,05 м²С/Вт в феврале-марте, 3,7 м²С/Вт в июне (см. рис. 9).

Температура внутри помещения колеблется в течение года от 18 до 25,5 °С, а влажность 30...60 % (см. рис. 7). Температура на внутренней поверхности отделочного гипсокартонного листа далека от точки росы (см. рис. 8). Критическое содержание влаги в панели, приводящее к образованию

грибка и плесени, и расчетное содержание влаги в рядовом сечении панели «Элевит» удовлетворяет комфортным и гигиеническим требованиям (см. рис. 11).

Результаты расчетов показали, что конструкция панели АСС «Элевит» удовлетворяет нормативным требованиям по эксплуатации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Возможности применения системы «Элевит» в малоэтажном строительстве // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2013. Вып. 3(28). URL: [http://vestnik/vgasu/attachmentChesnokova-2013\\_3\(28\).pdf](http://vestnik/vgasu/attachmentChesnokova-2013_3(28).pdf) (дата обращения : декабрь 2013 г.).

2. WUFI Pro 5 Manual / D. Zirkelbach, Th. Schmidt, M. Kehrер, H. M. Kunzel. 43 p.

3. Krus M. Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral Building Materials. Theoretical Principles and New Test Methods. Fr3. aunhofer IRB Verlag, 1996.

1. Vozmozhnosti primeneniya sistemy «Elevit» v maloetazhnom stroitel'stve // Internet-vestnik VolgGASU. Ser.: Politematicheskaya. 2013. Vyp. 3(28). URL: [http://vestnik/vgasu/attachmentChesnokova-2013\\_3\(28\).pdf](http://vestnik/vgasu/attachmentChesnokova-2013_3(28).pdf) (data obrashcheniya : dekabr' 2013 g.).

2. WUFI Pro 5 Manual / D. Zirkelbach, Th. Schmidt, M. Kehrер, H. M. Kunzel. 43 p.

3. Krus M. Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral Building Materials. Theoretical Principles and New Test Methods. Fr3. aunhofer IRB Verlag, 1996.

© Жарков А. Ф., Чеснокова О. Г., 2014

*Поступила в редакцию  
в ноябре 2013 г.*

*Ссылка для цитирования:*

*Жарков А. Ф., Чеснокова О. Г. Расчет влияния температурно-влажностного воздействия на панели АСС «Элевит» // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 90—98.*

УДК 621.315.616.97

**А. С. Калашникова, Т. К. Акчурин, О. Ю. Пушкарская**

## **МНОГОКОМПОНЕНТНАЯ ПОЛИМЕРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ГИДРОИЗОЛЯЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Проблема дефицита и дороговизны исходных материалов для эпоксидных модифицированных гидроизоляционных композиций может решаться путем использования техногенных отходов полимерного и минерального состава. Предлагается многокомпонентная полимерная система для гидроизоляции строительных конструкций на основе полимерных отходов. Структура пленкообразования при нанесении полимерной многокомпонентной системы обеспечивает эффект «самозалечивания» путем заполнения и блокирования пор и трещин в поверхностном слое образца, что может обуславливать снижение водопоглощения и гидроизоляционные свойства состава композиции.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** гидроизоляция, пленкообразование, эпоксидная смола, полимерная композиция.

The problem of shortage and high cost of the raw materials for the epoxy modified waterproofing compositions can be solved through the use of technogenic waste polymer and mineral composition. The authors offer multicomponent polymer system for waterproofing of building structures based on polymeric wastes. The structure of film formation during application of multicomponent polymer systems provides the effect of "self-healing" by filling in and blocking the pores and cracks in the surface layer of the sample, which may cause decrease in water absorption and waterproofing properties of the composition.

**Key words:** waterproofing, film-formation, epoxy resin, polymer composition.

Остаются актуальными и требуют комплексного подхода проблемы защиты бетонных поверхностей от воздействия воды, агрессивных сред, атмосферных воздействий. Разработка полимерных составов на отечественных сырьевых материалах и технологий их изготовления, которые обеспечивают стабильное качество покрытий и его низкую себестоимость, является актуальной задачей проводимых исследований в области гидроизоляции. Из общего перечня возможных видов гидроизоляции окрасочная и мастичная являются наиболее экономичными. Эти технологии менее трудо- и материалоемки и поддаются комплексной механизации, поэтому им отдается предпочтение, если получаемое покрытие удовлетворяет условиям долговечности и надежности.

Наибольший интерес представляют полимерные пропиточные материалы со специфическими свойствами, гидрофобизирующими, создающими гидроизоляционный слой на поверхности бетона. Синтетические смолы в виде вязких жидкостей, порошков или гранул, в зависимости от способа производства, используют для получения полимерных гидроизоляционных материалов.

Для гидроизоляции используют: модифицированные эпоксидные, фенолформальдегидные, фурановые мастики, арзамит, фаизол; фурановые, эпоксидные, полиэфирные полимеррастворы и полимербетоны; бутилкаучуковые, полисульфидные, наиритовые, кремнийорганические мастичные герметики, к которым относятся термоэластопласты и компаунды.

Для окрасочной гидроизоляции применяют составы на основе эпоксидных смол, представляющие их смеси с другими органическими материалами-модификаторами, например пековым дистиллятом, фурфуроловыми смолами, сланцевыми фенолами и др. В эти составы композиций входят растворители (ацетон, сольвент) и микронаполнители, такие как тонкомолотый песок, цемент, кислотоупорный цемент, маршалит, пылевидный кварц, железный сурик. Композиции состоят из двух компонентов: полимерного полуфабриката и отвердителя. Практически во всех сложных условиях эксплуатации эпоксидные модифицированные покрытия наиболее применимы, но дороговизна и дефицитность материалов ограничивают область их применения. Наиболее сложные условия эксплуатации — сочетание агрессивной среды, повышенной эксплуатационной температуры (до 160 °С) и кавитационных воздействий (скорость воды до 60 м/с) — оправдывают экономическую целесообразность использования модифицированных эпоксидных композиций.

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 для исследователей и экономическая целесообразность. Поэтому представляют определенный интерес исследования порошкообразного полимерного отхода, состоящего практически на 99,5 % из эпоксидной смолы. Порошок полимера собирается в системе аспирации при нанесении порошкового антикоррозионного покрытия на металлические поверхности. Собирающийся на фильтрах аспирационной системы порошкообразный полимер является неизбежными технологическими потерями процесса нанесения порошкового антикоррозионного покрытия. Порошкообразная эпоксидная смола, пройдя технологический передел нанесения на поверхность, не теряет своих термореактивных свойств и может быть использована как вторичное сырье. Причинно-следственная связь между совокупностью существенных признаков предлагаемых исследований и достигаемым техническим результатом заключается в разработке составов полимерной композиции на основе вторичного порошка эпоксидной смолы для эффективной гидроизоляции поверхностей конструкций из бетона, железобетона, кирпича [1].

Вторичный порошок эпоксидной смолы (компонент А) относится к классу термореактивных полимеров. При полимеризации эпоксидных олигомеров происходит пространственная, трехмерная «сшивка» молекул. После отверждения эти материалы не могут подвергаться вторичной термической переработке. Введение в эпоксидный порошок отвердителя (компонент В), например полиаминов, в различных количествах позволяет регулировать сроки твердения и управлять процессом полимеризации композиции. Для повышения прочности и модуля упругости, снижения хрупкости во вторичный порошок эпоксидной смолы вводили модифицирующую добавку (компонент Б). Выбранный растворитель для композиции — это компонент Г. Таким образом, предметом исследования является полимерная композиция для гидроизоляции строительного назначения, представляющая собой многокомпонентную полимерную систему холодного отверждения (МПСХО).

Большинство строительных материалов имеют пористую структуру и довольно хорошо пропускают воду. Для пропитки поверхности строительных материалов гидроизоляционным полимерным составом решающее значение имеют адгезионные характеристики МПСХО и характер смачивания поверхности раствором композиции. Основными являются поверхностное натяжение жидкости относительно твердой поверхности, краевой угол смачивания, связанные между собой уравнением Дюпре — Юнга [2].

Пропитка поверхности материала может происходить самопроизвольно, под действием капиллярного давления. Смачивающая жидкость под действием капиллярных сил всегда перемещается от низшего потенциала к высшему, т. е. происходит перекачка жидкости из широких капилляров в узкие. Это означает, что в пористом материале пропитывающая жидкость будет перемещаться из крупных пор в мелкие и наоборот.

Если условие самопроизвольной пропитки не выполняется, то полимерный раствор МПСХО не проникнет вглубь пористого каркаса при любой длительности контакта фаз.

Метод счета капель считается самым простым способом измерения поверхностного натяжения с технической точки зрения. Лучшими показателями для расчета поверхностного натяжения МПСХО обладает формула

$$m = F2\pi R\sigma/g, \quad (1)$$

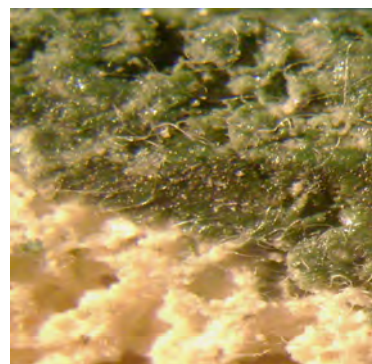
где  $F$  — поправка, в нашем исследовании равна 0,2482. Значения поправок  $F$  являются табличными.

Объем капли раствора МПСХО равен 0,5 мл, масса — 0,0136 кг.

Использование этой формулы для расчетов позволяет определять поверхностное натяжение с точностью до 0,1...0,2 %. Поверхностное натяжение раствора МПСХО равно 41,58 мДж/м<sup>2</sup>, краевые углы смачивания определяли методом проектирования капли на экран. Для данной системы МПСХО краевой угол смачивания равен 23,64°.

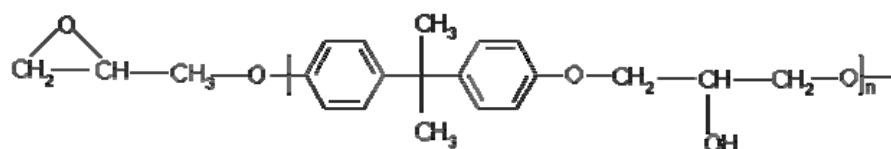
Самопроизвольная пропитка твердого тела возможна, если краевой угол смачивания < 90°. Чем меньше угол смачивания, тем легче осуществляется пропитка материала. В нашем случае данное условие выполняется (23,64° < 90°), что подтверждается экспериментальными исследованиями.

Исследования структуры поверхности проводились методами оптической микроскопии (МБС-9, 10). Структура пленкообразования при нанесении МПСХО (рис., б) обеспечивает эффект «самозалечивания» путем заполнения и блокирования пор и трещин в поверхностном слое образца, что может обуславливать снижение водопоглощения и высокие гидроизоляционные свойства состава МПСХО [3]. Соотношение сухого компонента композиции и растворителя определяет толщину одного слоя, но она не является определяющим фактором для покрытия в целом. Эффект водонепроницаемости обеспечивается за счет ряда строго последовательных химических реакций между компонентами МПСХО, продолжающимися во времени, а также процессами смачивания и адгезии, проходящих внутри структуры защищаемого материала, в результате чего заполняются капилляры, поры и микротрещины поверхности (рис., а—б).

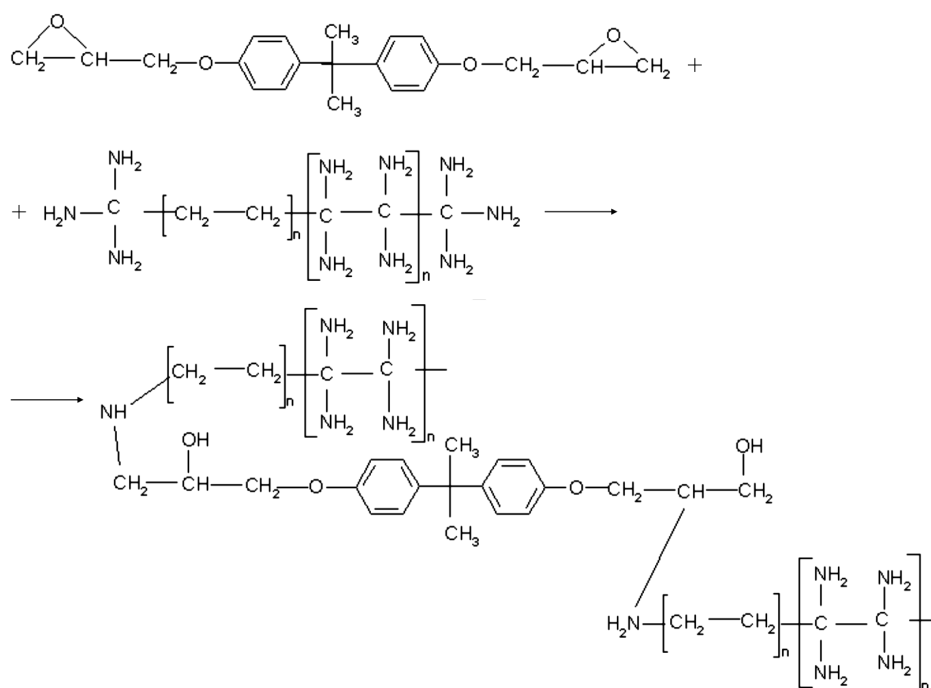


Структура поверхности бокового среза образца шамотного кирпича перед нанесением покрытия (а) и после нанесения покрытия (б)

### Общая формула эпоксидной смолы



Для холодного отверждения эпоксидной смолы используют полиаминные отвердители, например полиэтиленполиамин (ПЭПА), триэтилентетрамин (ТЭТА). Ниже представлена реакция взаимодействия эпоксидной смолы ЭД-20 с отвердителем ПЭПА.



При отверждении атомы водорода аминогруппы взаимодействуют с атомами кислорода глицидиловых групп эпоксидной смолы, получается термоактивная смола с большим количеством пространственных связей [4]. Именно трехмерная структура обеспечивает высокие физико-химические свойства отвержденной смолы.

Выбор отвердителя для полимерной композиции очень важен. Соотношение атомов кислорода глицидола и атомов водорода аминов с учетом различных молекулярных масс и плотностей влияет на соотношение смолы и отвердителя в композиции. Несоблюдение соотношений в конечном итоге приведет к снижению прочности отвержденной смолы из-за неполного образования пространственных связей. Выбор отвердителя также влияет на время отверждения эпоксидной смолы. Время желатинизации (гелеобразования) определяет время для данной массы полимерной композиции, находящейся в компактном объеме, для ее обращения в твердое состояние. Важно учитывать начальную температуру смеси и отношение площади покрытия к массе композиции. Время работы с полимерной композицией составляет примерно 75 % от ее времени желатинизации, но этот процент можно варьировать за счет вязкости смеси и площади нанесения. Анализ процессов полимеризации и факторов, влияющих на скорость их протекания, способствует оптимизации компонентного состава МПСХО.

Полученные результаты на данном этапе исследований позволяют говорить о преимуществах полимерной композиции МПСХО в сравнении с традиционными полимерными составами на основе эпоксидных смол (ЭД-16, ЭД-20 и т. п.). Полученный состав является тонкодисперсным порошкообразным материалом, что облегчит доставку его непосредственно к месту выполнения работ. Рекомендуемые растворители добавляются непосредственно перед нанесением гидроизоляции. МПСХО наносится без предварительной подготовки бетонных поверхностей. Обладая пропиточными свойствами, нанесенная МПСХО значительно сокращает операцию обработки бетонной поверхности и позволяет снизить дефектность цементного камня, что приведет к повышению прочности бетонной конструкции. Для улучшения прочностных характеристик МПСХО ее можно армировать дисперсным материалом минеральной природы. Недостаток при работе с МПСХО состоит в том, что трудно добиться гарантированной толщины изолирующей пленки, особенно при больших неровных поверхностях.

Разработка нового состава многокомпонентной полимерной системы холодного отверждения на основе отходов промышленных предприятий региона позволит расширить сырьевую базу исходных компонентов для полимерной гидроизоляции строительного назначения. Использование техногенных отходов снижает себестоимость гидроизоляционной системы, что делает ее экономически целесообразной.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Батаев А. А., Батаев В. А. Композиционные материалы. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. 384 с.
2. Калашникова 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., 23—25 сент., 2013 г., Волгоград. Волгоград : ВолгГАСУ, 2013. С. 204—206.

3. Савосин А. В., Акчури Т. К., Пушкарская О. Ю. Методология исследования продуктов межфазового взаимодействия полимерного композита строительного назначения // Инженерные проблемы современного материаловедения : материалы внутривузовской науч.-техн. конф. Волгоград, 2009. С. 19—23.

4. Оудиан Дж. Основы химии полимеров : пер. с англ. М. : Химия, 1976. 326 с.

1. Bataev A. A., Bataev V. A. Kompozitsionnye materialy. Novosibirsk : Izd-vo NGTU, 2002. 384 s.

2. Kalashnikova A. S., Pushkarskaya O. Yu. Gidroizolyatsiya stroitel'nogo naznacheniya — mirovoy i otechestvennyy opyt // Inzhenernye problemy stroitel'nogo materialovedeniya, geotekhnicheskogo i dorozhnogo stroitel'stva : materialy IV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., 23—25 sent., 2013 g., Volgograd. Volgograd : VolgGASU, 2013. S. 204—206.

3. Savosin A. V., Akchurin T. K., Pushkarskaya O. Yu. Metodologiya issledovaniya produktov mezhfazovogo vzaimodeystviya polimernogo kompozita stroitel'nogo naznacheniya // Inzhenernye problemy sovremennogo materialovedeniya : materialy vnutrivuzovskoy nauch.-tekhn. konf. Volgograd, 2009. S. 19—23.

4. Oudian Dzh. Osnovy khimii polimerov : per. s angl. M. : Khimiya, 1976. 326 s.

© Калашникова А. С., Акчури Т. К., Пушкарская О. Ю., 2014

*Поступила в редакцию  
в феврале 2014 г.*

*Ссылка для цитирования:*

Калашникова А. С., Акчури Т. К., Пушкарская О. Ю. Многокомпонентная полимерная система для гидроизоляции строительных конструкций // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 99—104.



УДК 691

**В. В. Леснов, В. Т. Ерофеев**

# **ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КАРКАСНЫХ КОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФИБРОЙ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ**

Приведены результаты исследования свойств каркасных композитов, армированных металлической фиброй различных видов. Получены математические модели физико-механических свойств каркасных бетонов, отмечено их улучшение при введении дисперсной металлической арматуры.

**Ключевые слова:** каркасные композиты, дисперсная металлическая арматура, математические модели прочностных свойств.

The results of investigation of properties of carcass composites reinforced with metal fiber of different types are presents. Mathematical models of physical and mechanical properties of carcass concrete are received, their improvement with the introduction of dispersed metal fittings are noted in the article.

**Key words:** carcass composites, dispersed metal fitting, mathematical models of strength properties.

Улучшение прочностных свойств и долговечности бетонов, а также снижение их материалоемкости достигается с помощью инновационных технологий приготовления композитов. К ним относятся материалы, получаемые методом пофазного формования, бетоны с фиксированным щебеночным каркасом, каркасные композиты и т. д. [1, 2]. Данные бетоны изготавливаются в следующем порядке: на первом этапе из зерен крупного заполнителя получают каркас, на втором — осуществляют заполнение пустот матричным составом. Изготовление крупнопористого каркаса может осуществляться как склеиванием между собой зерен крупного заполнителя, так и их уплотнением.

Введение в состав бетонов дисперсной металлической арматуры (ДМА, фибры) увеличивает прочность композитов, долговечность, трещиностойкость, морозостойкость, снижает истираемость и толщину конструкции [3]. Поэтому исследование свойств дисперсно-армированных каркасных композитов (ДАКК) является актуальной задачей.

Целью работы являлось исследование влияния вида и количества дисперсной арматуры на упруго-прочностные свойства каркасных композитов.

Технология изготовления композитов была следующей: получали каркас, перемешивая всухую крупный заполнитель с ДМА в течение 2 мин. Фибру вводили тремя равными порциями, после чего смесь укладывали в формы и уплотняли. В качестве крупного заполнителя применяли щебень марки 1200 фракции 5...10 мм (ОАО г. Миньяр). Состав матрицы был следующим: портландцемент марки «Цем II/A–П 42,5» ГОСТ 31108—2003 (ОАО «Мордовцемент»), суперпластификатор марки Sika 5/600-5/800 в количестве 1,0 % от массы вяжущего по сухому веществу, В/Ц = 0,5. Матричную композицию готовили в миксере, перемешивая в течение 2 мин, подвижность матрицы по вискозиметру «Суттарда» была равна 27,5...28 см. Дисперсную металлическую арматуру применяли типа «Драмикс 50/1», «Волна 50/1», «Весло 50/1» и «РТСЛ 40/1,1» (в числителе стоит длина ДМА, а в знаменателе — ее диаметр, мм). Количество ДМА составляло 0; 0,5; 1,0 и 1,5 % по объему композита.

Каркасный ДМА-композит получали, пропитывая каркас матричным составом при подаче смеси в пустоты сверху вниз. Каркасы и каркасные ДМА-композиты уплотняли на встряхивающем столике 30 ударами с частотой 1 удар/с. Образцы после суточного твердения подвергали тепловлажностной обработке при 95 °С в течение 8 ч. Испытания по определению упруго-прочностных характеристик производили на образцах-балочках размером  $4 \times 4 \times 16$  см.

После обработки результатов были получены математические модели физико-механических свойств каркасных дисперсно-армированных композитов, которые приведены в табл.

*Математические модели свойств каркасных композитов*

| Физико-механические свойства                            | Вид дисперсной металлической арматуры |                  |                  |                  |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
|                                                         | «Драмикс 50/1»                        | «Весло 50/1»     | «Волна 50/1»     | «РТСЛ 40/1,1»    |
| Средняя плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>            | 2100 + 131,7μ                         | 2100 + 108,0μ    | 2100 + 89,3μ     | 2100 + 76,0μ     |
| Предел прочности при изгибе $R_b$ , МПа                 | 2,75 + 1,75μ                          | 2,75 + 1,63μ     | 2,75 + 1,94μ     | 2,75 + 2,19μ     |
| Предел прочности при сжатии $R_b$ , МПа                 | 13,0 + 2,11μ                          | 13,0 + 1,83μ     | 13,0 + 1,50μ     | 13,0 + 0,34μ     |
| Предельные деформации сжатия $\varepsilon_b$ , отн. ед. | 0,0275 + 0,0126μ                      | 0,0275 + 0,0104μ | 0,0275 + 0,0087μ | 0,0275 + 0,0065μ |
| Начальный модуль упругости при сжатии $E_b$ , МПа       | 19100 + 2755,9μ                       | 19100 + 2471,3μ  | 19100 + 2101,0μ  | 19100 + 1370,1μ  |

*Примечание:* μ — процент содержания ДМА по объему.

Графики упруго-прочностных показателей каркасных ДМА-композитов, построенные по математическим моделям, показаны на рис. 1—3.

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1. Введение в каркасные бетоны дисперсной металлической арматуры различных видов позволяет получать композиты с пределом прочности при изгибе 2,8...6,0 МПа, при сжатии 13,0...16,0 МПа, предельными деформациями сжатия 0,028...0,045, начальным модулем упругости 19 100...23 110 МПа, средней плотности 2100...2290 кг/м<sup>3</sup>.

2. При содержании ДМА видов «Драмикс 50/1», «Волна 50/1», «Весло 50/1» и «РТСЛ 40/1,1», в количестве 0,5...1,5 % по объему, прочность ДМА каркасных композитов при изгибе увеличивается соответственно в 1,36...1,94; 1,41...2,06; 1,33...1,87 и 1,48...2,17 раза, при сжатии — на 11...23; 5...17, 7...21 и 1...5 % предельные деформации сжатия — на 28...66; 17...45; 22...53 и 11...36 %, начальный модуль упругости — на 8...21; 5...16; 6...20 и 4...11 %, средняя плотность — на 4...9; 3...6; 3...7 и 2...5 % по сравнению с составами бетонов без ДМА.

3. Наибольшее увеличение прочности при изгибе получено при введении ДМА типа «РТСЛ 40/1,1», а прочности при сжатии, предельной деформации сжатия, начального модуля упругости и средней плотности — ДМА типа «Драмикс 50/1».

4. Полученные упруго-прочностные характеристики каркасных композитов, армированных ДМА различных видов, позволяют использовать их в эффективных конструкциях дорожных покрытий и полов с уменьшенной толщиной.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каркасные строительные композиты : В 2 ч. Ч. 1. Структурообразование. Свойства. Технология / В. Т. Ерофеев, Н. И. Мищенко, В. П. Селяев, В. И. Соломатов ; под ред. В. И. Соломатова. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 1995. 200 с.

2. Лихолетов О. Д., Мощанский Н. А., Путляев И. Е. Пофазное формирование структуры полимербетонов // Применение полимерных смол в бетонных и железобетонных конструкциях. Вильнюс, 1971. С. 113—115.

3. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. М. : Изд-во АСВ, 2004. 559 с.

1. Karkasnye stroitel'nye kompozity : V 2 ch. Ch. 1. Strukturoobrazovanie. Svoystva. Tekhnologiya / V. T. Erofeev, N. I. Mishchenko, V. P. Selyaev, V. I. Solomatov ; pod red. V. I. Solomatova. Saransk : Izd-vo Mordov. un-ta, 1995. 200 s.

2. Likholetov O. D., Moshchanskiy N. A., Putlyayev I. E. Pofaznoe formirovanie struktury polimerbetonov // Primenenie polimernykh smol v betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiyakh. Vil'nyus, 1971. S. 113—115.

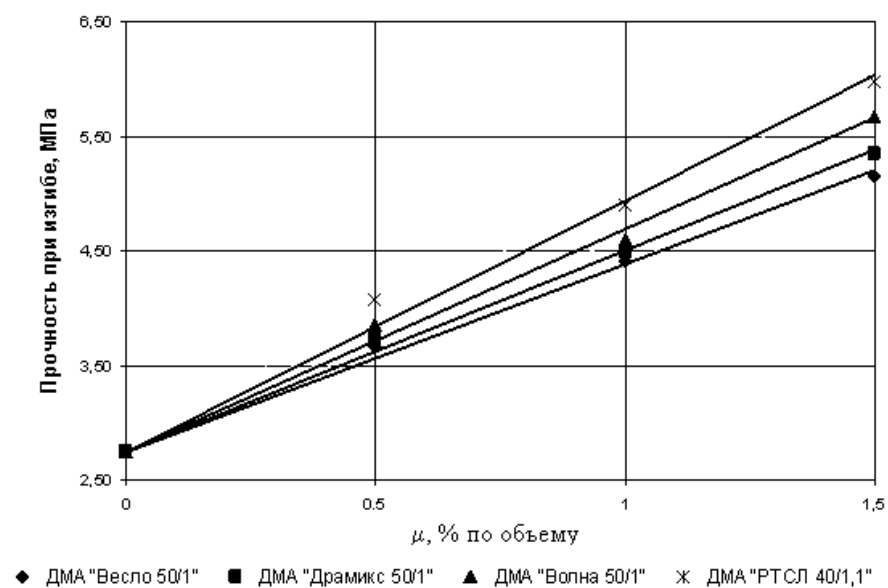
3. Rabinovich F. N. Kompozity na osnove dispersno-armirovannykh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstruktсии. M. : Izd-vo ASV, 2004. 559 s.

© Леснов В. В., Ерофеев В. Т., 2014

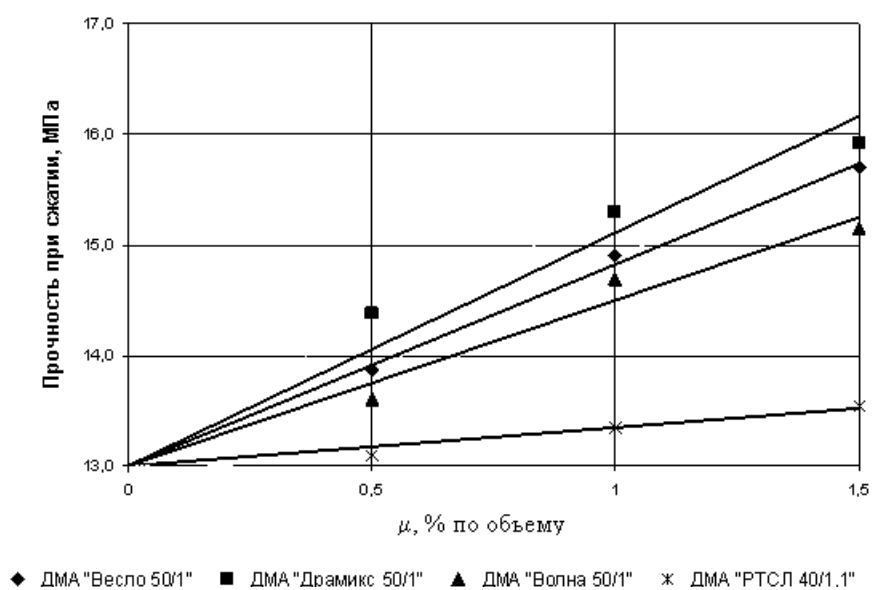
Поступила в редакцию  
в октябре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Леснов В. В., Ерофеев В. Т. Исследование свойств каркасных композитов, армированных металлической фиброй различных видов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 105—110.



*a*



*б*

Рис. 1. Прочностные свойства каркасных композитов, армированных различными видами ДМА: *a* и *б* — пределы прочности при изгибе и сжатии соответственно

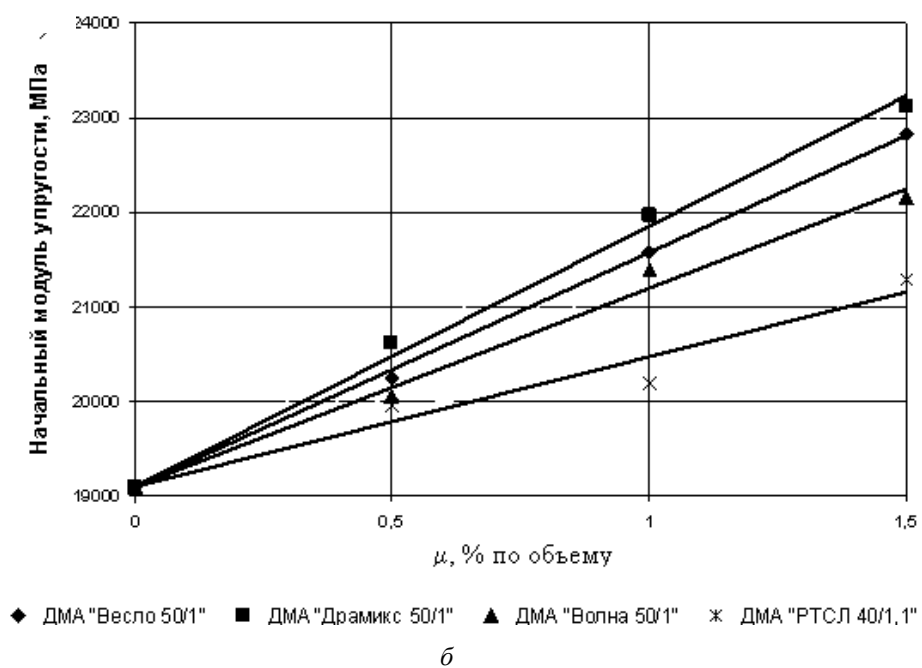
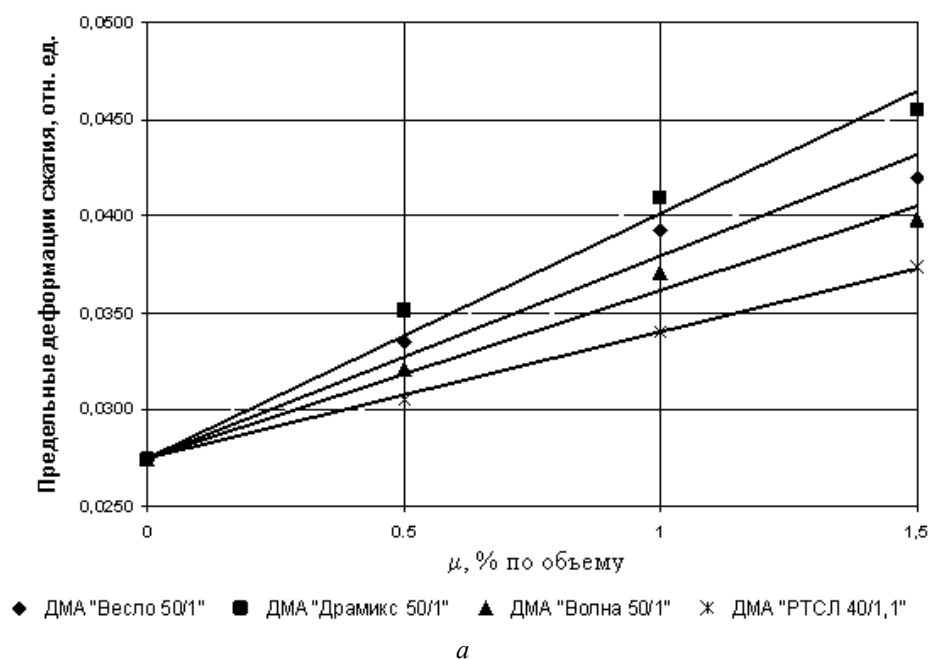


Рис. 2. Деформативные свойства каркасных композитов, армированных различными видами ДМА: *a* и *b* — предельные деформации при сжатии и начальный модуль упругости соответственно

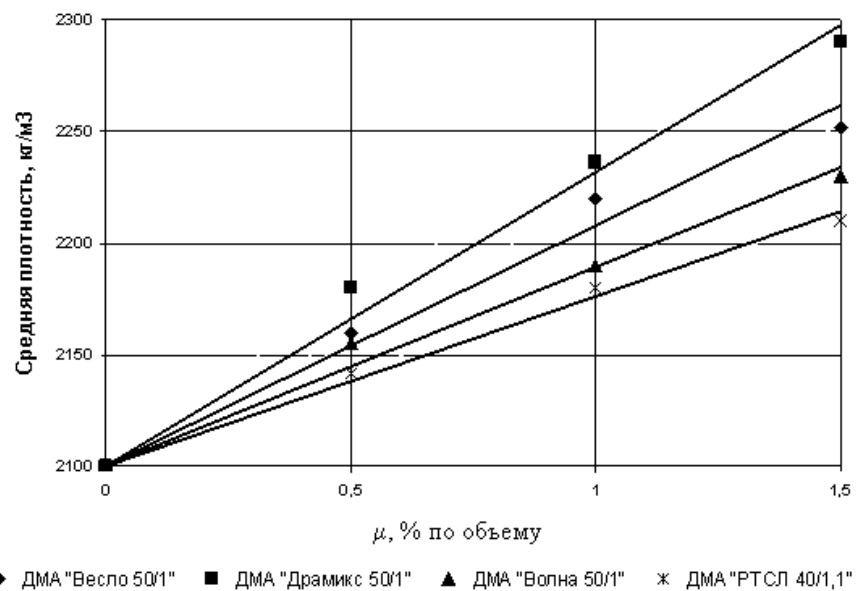


Рис. 3. Средняя плотность каркасных композитов, армированных различными видами ДМА

УДК 691

**В. В. Леснов**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАПОЛНЕННЫХ МАТРИЧНЫХ И КЛЕЕВЫХ СОСТАВОВ ДЛЯ КАРКАСНЫХ БЕТОНОВ**

Приведены результаты исследования свойств наполненных цементных клеевых и матричных композиций для каркасных бетонов. Получены математические модели физико-механических свойств, отмечено их улучшение при введении различных наполнителей.

**Ключевые слова:** каркасные композиты, наполнитель, математические модели прочностных свойств.

The article presents the results of the research of properties of filled cement adhesive and matrix compositions for carcass concrete. The mathematical models of physical and mechanical properties are received, their improvement with the introduction of various fillers is noted.

**Key words:** carcass composites, filler, mathematical models of strength properties.

Процесс получения каркасных бетонов заключается в предварительном изготовлении пористого каркаса и последующей пропитки его матричным составом [1]. Каркас может быть получен методом соединения зерен крупного заполнителя клеевыми композициями, их спекания при повышенных температурах, виброуплотнения или трамбования, уложенных в форму заполнителей. Клеевые составы должны обладать хорошей адгезией к заполнителю каркаса, создавать клеевую прослойку требуемой толщины. К матрице предъявляются требования по необходимой подвижности, нерасслаиваемости и отсутствию нежелательных химических реакций в контакте с клеевой прослойкой или крупным заполнителем. Получение в этой связи эффективных наполненных клеевых и матричных составов, улучшение их физико-механических характеристик является актуальной задачей.

Целью работы являлось исследование влияния вида и содержания наполнителя на реологические, структурные и прочностные свойства клеевых и матричных композиций, применяемых для получения каркасных композитов.

Изучение физико-механических характеристик композитов осуществляли с применением матрицы планирования полнофакторного эксперимента типа ПФЭ<sup>2</sup>. В качестве факторов были приняты на уровнях  $-1$ ,  $0$  и  $+1$ .  $X_1$  — отношение количества наполнителя к цементу (Н/Ц), равное соответственно  $0$ ;  $0,15$ ;  $0,30$  и  $X_2$  — удельная поверхность наполнителя, равная  $350$ ,  $250$  и  $150 \text{ см}^2/\text{г}$ .

В качестве вяжущего использовали портландцемент «Цем I 52,5» (ОАО «Мордовцемент»), пластифицирующей добавки — суперпластификатор (СП) марки Melflux 1641 F, наполнителя — амфиболит Новокиевского месторождения (Оренбургская область, п. Новорудный) и отход производства — шлак Новолипецкого металлургического комбината. Количество СП было постоянным и равным  $0,5 \%$  от массы портландцемента по сухому веществу, а содержание наполнителя менялось от  $0$  до  $30 \%$ . Составы изготавливались с помощью смесителя при водоцементном отношении (В/Ц), равном  $0,4$ , время перемешивания составляло  $2$  мин. Композиции твердели сутки в нормально-

влажностных условиях, а затем их подвергали тепловлажностной обработке при 95 °С в течение 8 ч. Подвижность цементных композиций определяли по расплыву на вискозиметре «Суттарда», а определение физико-механических свойств затвердевших материалов проводили на образцах-призмах размером  $2 \times 2 \times 7$  см. В качестве контрольного рассматривался ненаполненный состав со следующими свойствами: расплыв цементного теста — 41,5 см, предел прочности при изгибе и сжатии — 8,82 и 48,4 МПа, средняя плотность — 1920 кг/м<sup>3</sup>.

После проведения статистической обработки, проверки значимости коэффициентов и адекватности были получены следующие математические модели физико-механических свойств цементных композитов, наполненных амфиболитом:

$$L^{sh} = 0,909 - 0,067X_1 + 0,028X_2 + 0,024X_1X_2 + 0,022 X_1^2;$$

$$R_i^{sh} = 1,205 + 0,076X_1 - 0,038X_2 - 0,030X_1X_2 - 0,129 X_1^2;$$

$$R_b^{sh} = 1,095 + 0,032X_1 - 0,020X_2 - 0,019X_1X_2 - 0,077 X_1^2 + 0,010 X_2^2;$$

$$\rho^{sh} = 1,042 - 0,015X_2 - 0,008X_1X_2 - 0,044 X_1^2 + 0,008 X_2^2.$$

При наполнении шлаком уравнения регрессии имеют другой вид:

$$L^{am} = 0,974 - 0,025X_1 + 0,013X_2 + 0,011X_1X_2;$$

$$R_i^{am} = 1,093 + 0,044X_1 - 0,035X_2 - 0,023X_1X_2 - 0,064 X_1^2 + 0,012 X_2^2;$$

$$R_b^{am} = 1,084 + 0,044X_1 - 0,023X_2 - 0,021X_1X_2 - 0,050 X_1^2;$$

$$\rho^{am} = 1,051 + 0,036X_1 - 0,008X_2 - 0,010X_1X_2 - 0,016 X_1^2,$$

где  $L^{sh}$ ,  $L^{am}$  — подвижность цементного теста;  $R_i^{sh}$ ,  $R_i^{am}$  и  $R_b^{sh}$ ,  $R_b^{am}$  — прочность при сжатии и изгибе;  $\rho^{sh}$ ,  $\rho^{am}$  — средняя плотность цементных композиций, наполненных соответственно шлаком и амфиболитом (отн. ед.).

Зависимости физико-механических показателей наполненных цементных композиций от отношения Н/Ц, построенные по математическим моделям, приведены на рис. 1—4.

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1. Введение наполнителей, при постоянном В/Ц, приводит к снижению подвижности цементного теста, наполненного шлаком и амфиболитом, соответственно на 8...19 и 3...7 % при максимальном их содержании, увеличение удельной поверхности наполнителей уменьшает подвижность цементного теста (см. рис. 1).

2. Введение наполнителей положительно влияет на пределы прочности композитов на изгиб и сжатие; при введении наполнителя с удельной поверхностью, равной 350, 250 и 150 см<sup>2</sup>/г, увеличение предела прочности на изгиб композитов, наполненных шлаком, составило соответственно: 26 % при Н/Ц = 0,21; 22 % при Н/Ц = 0,2 и 17,5 % при Н/Ц = 0,18, а порошком амфиболита: 15,5 % при Н/Ц = 0,22; 10 % при Н/Ц = 0,2 и 7,5 % при Н/Ц = 0,18 (см. рис. 2).



3. Увеличение предела прочности на сжатие при наполнении шлаком составило соответственно: 13 % при Н/Ц = 0,2; 10,5 % при Н/Ц = 0,19 и 8,5 % при Н/Ц = 0,18, а при введении амфиболита: 12,3 % при Н/Ц = 0,24; 9,5 % при Н/Ц = 0,22 и 6,0 % при Н/Ц = 0,2 (см. рис. 3).

4. Увеличение удельной поверхности наполнителя в принятом диапазоне от 150 до 350 см<sup>2</sup>/г приводит к росту средней плотности наполненных композитов, так при наполнении шлаком происходит ее увеличение на 2...6 % при соотношении Н/Ц = 0,1...0,2, после чего происходит ее снижение. Введение амфиболита также приводит к росту средней плотности на 5...7 % при Н/Ц = 0,3 (см. рис. 4).

5. Введение в цементные композиции шлакового и амфиболитового наполнителей, различной удельной поверхности, позволяет получать эффективные матричные и клеевые составы, пригодные для получения каркасных бетонов, с улучшенными физико-механическими показателями и пониженной стоимостью.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каркасные строительные композиты : В 2 ч. Ч. 1. Структурообразование. Свойства. Технология / В. Т. Ерофеев, Н. И. Мищенко, В. П. Селяев, В. И. Соломатов ; под ред. В. И. Соломатова. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 1995. 200 с.

1. Karkasnye stroitel'nye kompozity : V 2 ch. Ch. 1. Strukturoobrazovanie. Svoystva. Tekhnologiya / V. T. Erofeev, N. I. Mishchenko, V. P. Selyaev, V. I. Solomatov ; pod red. V. I. Solomatova. Saransk : Izd-vo Mordov. un-ta, 1995. 200 s.

© Леснов В. В., 2014

*Поступила в редакцию  
в октябре 2013 г.*

*Ссылка для цитирования:*

*Леснов В. В. Исследование физико-механических свойств наполненных матричных и клеевых составов для каркасных бетонов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 111—115.*

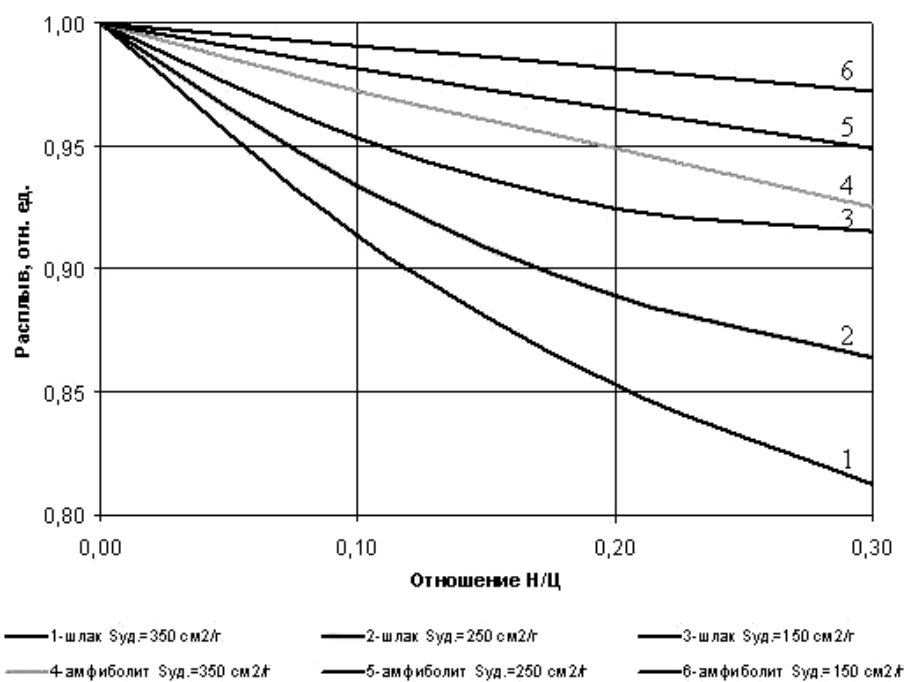


Рис. 1. Подвижность наполненных цементных композиций

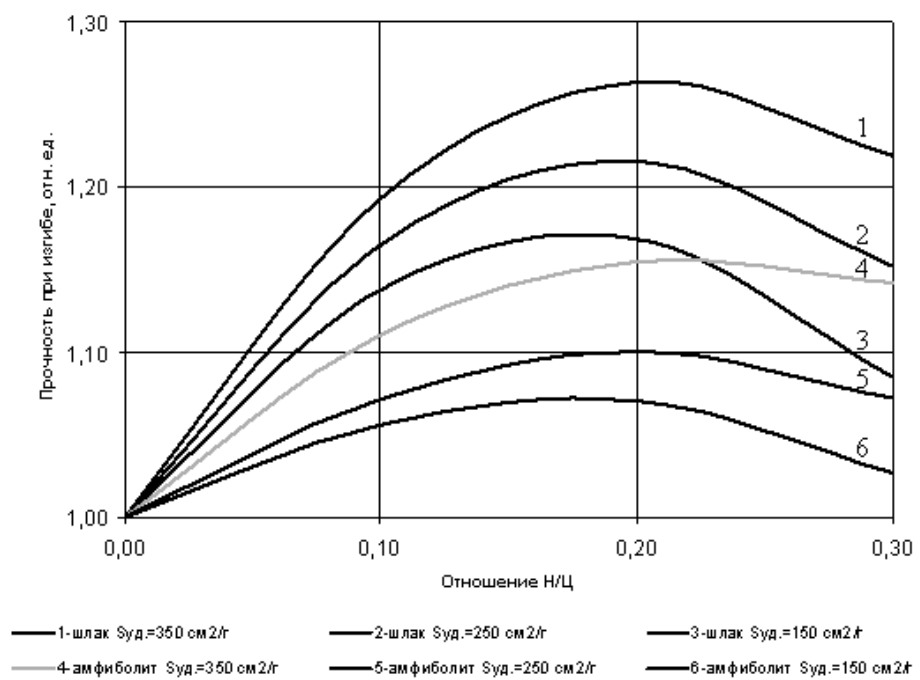


Рис. 2. Предел прочности при изгибе наполненных композитов

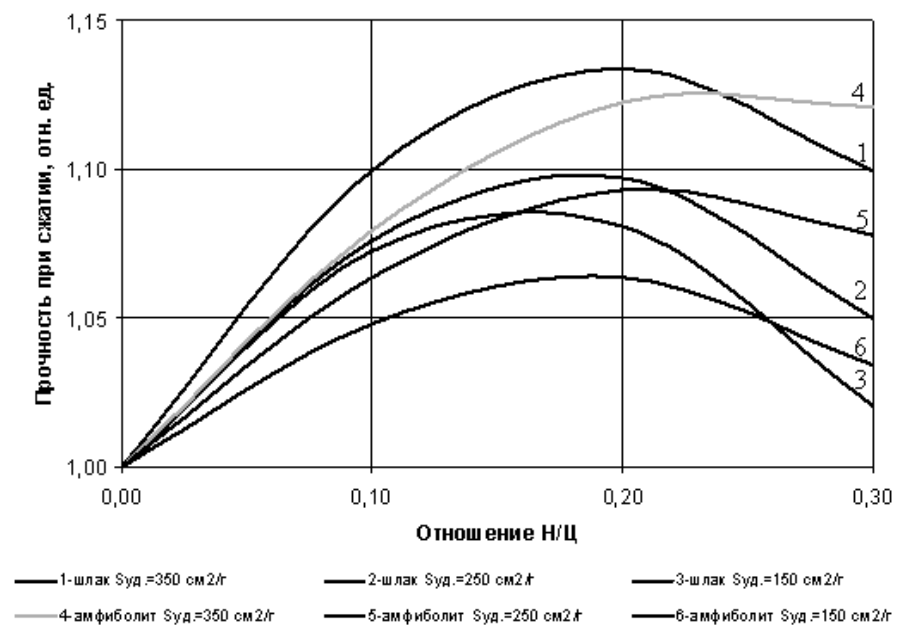


Рис. 3. Предел прочности при сжатии наполненных композитов

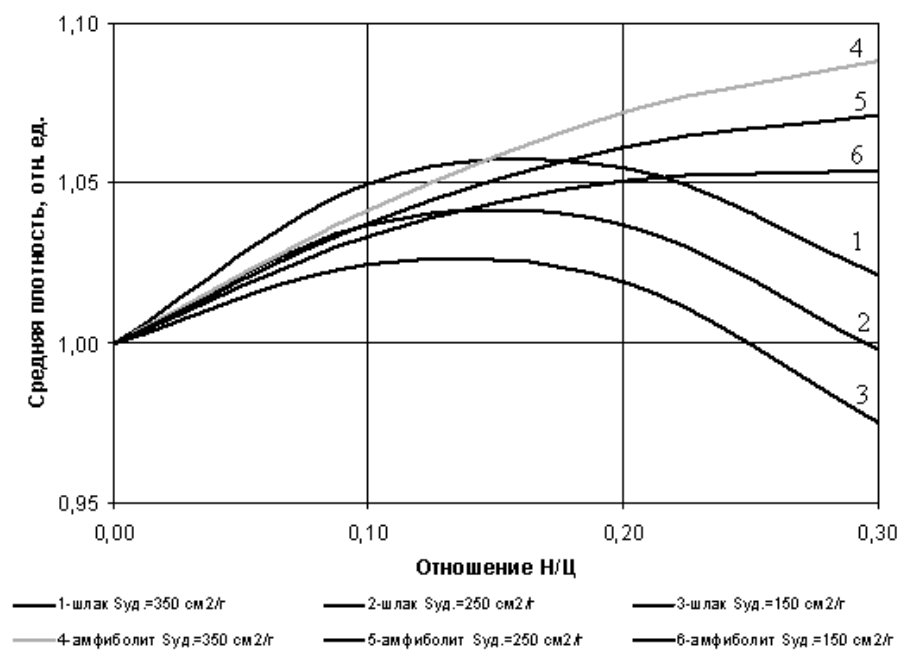


Рис. 4. Средняя плотность наполненных композитов

УДК 691.3:532.68

**А. Г. Перехоженцев, И. Ю. Груздо**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФфуЗИИ ВЛАГИ В ПОРИСТЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ**

Даны результаты исследования кинетики изменения коэффициента диффузии влаги во влажных пористых материалах ограждающих конструкций зданий в зависимости от влагосодержания.

**Ключевые слова:** коэффициент диффузии влаги, теплопроводность пористых строительных материалов, паропроницаемость строительных материалов.

The authors provide the results of studies of the kinetics of changes in the moisture diffusion coefficient of in wet porous materials of enclosing constructions of buildings depending on the moisture content.

**Key words:** moisture diffusion coefficient, hydraulic conductivity of porous construction materials, water vapor permeability of construction materials.

С внедрением новых теплоизоляционных материалов с повышенными изоляционными свойствами толщина ограждающих конструкций уменьшилась. В связи с этим увеличилась концентрация влаги на единицу объема материала, что оказывает существенное влияние на эксплуатационные свойства материалов. Одной из проблем прогноза тепловлажностного режима является сложность получения коэффициента диффузии влаги.

Наиболее распространенным методом расчета влажностного состояния наружных ограждений зданий является представление потока влаги в виде двух составляющих: потока парообразной влаги и потока жидкой влаги

$$J_w = J_n + J_\omega = \mu \nabla e + \beta \nabla \omega, \quad (1)$$

где  $\mu$  — коэффициент паропроницаемости (диффузии водяного пара);  $\nabla e$  — градиент парциального давления паров;  $\beta$  — коэффициент теплопроводности (диффузии жидкой влаги);  $\nabla \omega$  — градиент жидкой фазы влаги.

При этом коэффициент паропроницаемости пористого материала определяется по ГОСТ 25898—83 «Материалы и изделия строительные. Методы определения сопротивления паропроницанию» (М. : НИИСФ, 1983. С. 7), а коэффициент теплопроводности определяется по методам, приведенным в работе [1].

Границей между диффузией пара и жидкой влагой принято считать максимальное сорбционное влагосодержание материалов (равновесное  $\omega$ , при  $\phi = 98\%$ ). Однако эта граница весьма условна, так как жидкая фаза влаги в порах материалов образуется с началом капиллярной конденсации, которая возникает для многих пористых строительных материалов значительно раньше, чем максимальная сорбционная (при  $\phi = 70...80\%$ ).

С точки зрения эксплуатации наружных ограждающих конструкций из пористых материалов неважно, какое количество водяных паров прошло через конструкцию. Важно, какое количество жидкой фазы влаги образуется и остается в конструкции.

С этой точки зрения поток влаги через конструкцию можно записать следующим образом:

$$J_w = a(\omega_0) \nabla \omega_0, \quad (2)$$

где  $a(\omega_0)$  — коэффициент диффузии влаги в широком диапазоне увлажнения материала;  $\nabla \omega_0$  — градиент объемной влажности.

В данном случае коэффициент диффузии влаги представляет собой функцию от влагосодержания, т. е.  $a = f(\omega_0)$ .

В работе [2] предлагается методика получения такой зависимости. Суть метода заключается в следующем:

1. Изготавливают квадратный образец для испытания толщиной 10...20 мм и шириной 70...100 мм.
2. Боковые поверхности образца предварительно гидроизолируют (рис. 1).

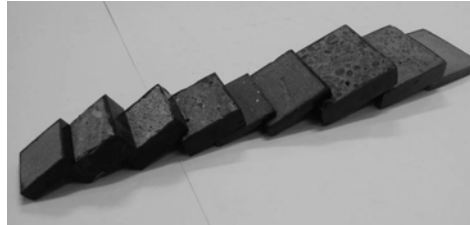


Рис. 1. Образцы пористых строительных материалов с гидроизолированными боковыми поверхностями

3. Отвакуумированный образец насыщают дегазированной дистиллированной водой.

4. Образец сушат в нормальных условиях и фиксируют изменение веса в течение времени до полной его стабилизации.

Таким образом мы получаем кривую сушки от полного насыщения образца  $w_{\max}$  до равновесной влажности с окружающей средой  $w_s$  (рис. 2).

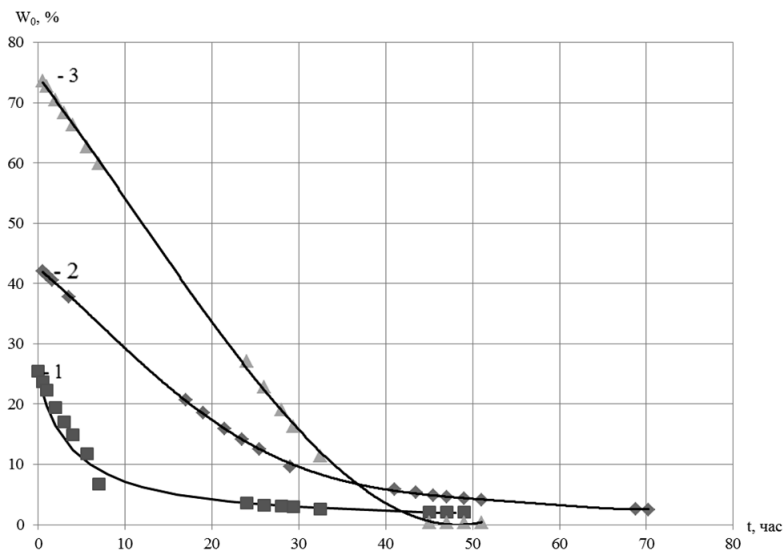


Рис. 2. Кривые сушки материала: 1 — цементно-песчаный раствор; 2 — керамзитобетон; 3 — пенобетон

Зависимость между средним влагосодержанием  $w_v(t)$  центрального слоя  $R_1$  (рис. 3) и средним влагосодержанием  $w_p(t)$  поверхностного слоя  $(R - R_1)$  можно найти по среднему влагосодержанию  $w_0(t)$  образца:

$$w_0(t)R = w_v(t)R_1 + w_p(t)(R - R_1). \quad (3)$$

Из (3) определим значения влагосодержаний:  
поверхностного слоя для периода поверхностной сушки

$$w_p(t) = \frac{w_0(t)R - w_v(t)R_1}{R - R_1}; \quad (4)$$

внутреннего слоя для периода глубинной сушки

$$w_v(t) = \frac{w_0(t)R - w_p(t)(R - R_1)}{R_1}. \quad (5)$$

Переход от поверхностной сушки к глубинной происходит при  $w_0 = \frac{(w_{\text{нас}} - w_{\text{ср}})_1}{2}$  при этом  $R_1 = R/2$ .

Здесь  $w_{\text{нас}}$  — влажность при насыщенном состоянии образца;  $w_{\text{ср}}$  — равновесная влажность образца, соответствующая относительной влажности окружающей среды.

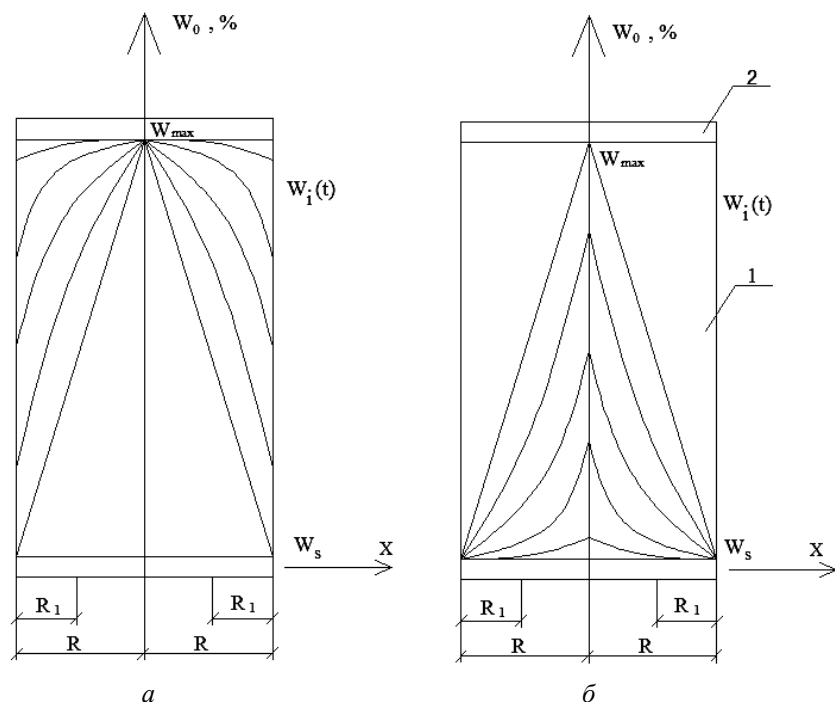


Рис. 3. Схема изменения влагосодержания в образце при двухсторонней сушке: *a* — период поверхностной сушки; *б* — глубинная сушка: 1 — образец; 2 — теплоизоляция

После снятия показаний эксперимента становится возможным расчет коэффициента диффузии при любой относительной влажности образца по формуле, полученной в работе [2]

$$a_m = \frac{dw}{dt} \left[ \frac{(R^2 - R_1^2)}{6[w_v(t) - w_0(t)]} \right]. \quad (6)$$

Аппроксимация графиков сушки проводилась методом наименьших квадратов. Далее по (6) вычисляется коэффициент диффузии влаги в зависимости от влажности  $w_0$  и строится соответствующий график зависимости  $a_m(w_0)$ .

Результаты эксперимента приведены на рис. 4 для трех наиболее характерных строительных материалов.

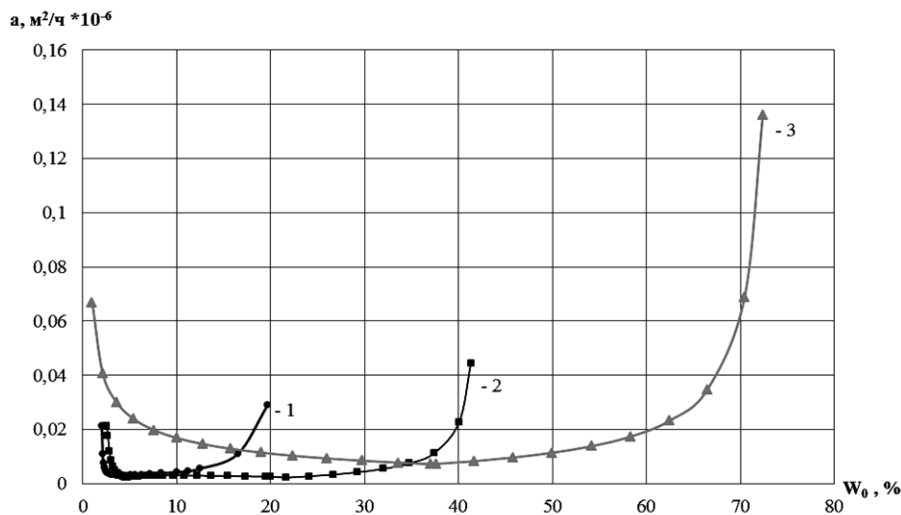


Рис. 4. Изменение коэффициента диффузии влаги: 1 — цементно-песчаный раствор; 2 — керамзитобетон; 3 — пенобетон

Из рис. 4 следует, что понижение коэффициента диффузии на начальном участке при  $w_0 = 0$  связано с постепенным закупориванием сквозных пор жидкой сорбционной влагой. По всей видимости плавный горизонтальный участок соответствует пленочному движению жидкой фазы влаги. Дальнейший рост коэффициентов диффузии влаги связан с началом объемного движения жидкой фазы до полного насыщения пор.

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

Представленная методика позволяет из одного опыта, который в естественных условиях длится примерно 2—3 суток, получить коэффициенты диффузии влаги в пористых материалах во всем диапазоне увлажнения. Это позволяет решать задачи тепловлажностного режима однородных ограждающих конструкций зданий по уравнению (2), аналогичному уравнению Фурье на основе градиента влагосодержания. Для многослойных конструкций необходимо иметь граничные условия IV рода, т. е. соответственно равновесных влагосодержаний на стыках материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фокин К. Ф.* Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М., 2008. С. 166—237.
2. *Перехоженцев А. Г.* Теоретические основы и методы расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций зданий. Волгоград : ВолгГАСУ, 2008. С. 72—78.
1. *Fokin K. F.* Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastey zdaniy. M., 2008. S. 166—237.
2. *Perekhozhentsev A. G.* Teoreticheskie osnovy i metody rascheta temperaturno-vlazhnostnogo rezhima ograzhdayushchikh konstruktсий zdaniy. Volgograd : VolgGASU, 2008. S. 72—78.

© *Перехоженцев А. Г., Груздо И. Ю.*, 2014

*Поступила в редакцию  
в октябре 2013 г.*

*Ссылка для цитирования:*

*Перехоженцев А. Г., Груздо И. Ю.* Исследование диффузии влаги в пористых строительных материалах // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 116—120.



УДК 666.972

*Н. С. Хирис, Т. К. Акчурина***ФОРМИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА  
ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ И ПРОЧНОСТИ ПРИ НАПОЛНЕНИИ  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМ ШЛАКОМ И ДВУХЧАСТОТНОМ ВИБРОУПЛОТНЕНИИ**

Исследование возможности использования в качестве микронаполнителя мелкозернистого бетона металлургических шлаков Волжского трубного завода представляется целесообразным. Для оптимизации параметров технологии изготовления высоконаполненного мелкозернистого бетона с использованием двухчастотного вибрационного уплотнения важно определить влияние соотношения цемента и шлакового наполнителя на физико-механические характеристики мелкозернистого бетона, наполненного тонкомолотым металлургическим шлаком. Двухчастотное виброуплотнение бетона с использованием шлакового микронаполнителя позволяет получить бетонные смеси с улучшенными техническими характеристиками. Исследования структуры образцов высоконаполненного мелкозернистого бетона проведены методами оптической микроскопии.

**Ключевые слова:** наполнители бетонов, композит, техногенные отходы, состав, структура, двухчастотное виброуплотнение.

The study of the possible use of fine-grained concrete of metallurgical slag from Volzhskiy pipe plant as micro-filler is considered reasonable. To optimize the parameters of the technology of manufacturing highly filled fine-grained concrete with the use of two-frequency vibrocompaction it is important to determine the influence of the balance between cement and slag filler on physical and mechanical properties of fine-grained concrete filled with floured metallurgical slag. Two-frequency vibrocompaction of concrete with the use of slag micro-filler allows to receive concrete mixtures with better technical characteristics. The research of the structure of the samples of highly filled fine-grained concrete are carried out by the methods of optical microscopy.

**Key words:** fillers of concrete, composite, technogenic waste, content, structure, two-frequency vibrocompaction.

Экономичность цементных композиционных материалов повышается с введением минеральных дисперсных наполнителей, что снижает стоимость цементной смеси, повышает технологические свойства и эксплуатационные характеристики бетона. В качестве минеральных тонкодисперсных добавок используют молотый кварцевый песок, порошкообразный кремнезем, доменные шлаки, топливные шлаки, золы, добавки из осадочных и вулканических пород и т. д. Использование тонкодисперсных добавок при внешнем механическом воздействии создает плотную структуру цементного камня, что обеспечивает высокую прочность мелкозернистого бетона [1].

Для получения высокопрочного мелкозернистого бетона с высоким наполнением цементной матрицы, как правило, в качестве микронаполнителя используется измельченный до удельной поверхности  $450...500 \text{ м}^2/\text{кг}$  кварцевый песок. Исследование возможности использования в качестве микронаполнителя высоконаполненного мелкозернистого бетона (ВНМЗБ) металлургических шлаков Волжского трубного завода представляется целесообразным.

Металлургические шлаки Волжского трубного завода (ВТЗ) представляют собой сыпучий материал темно-серого цвета крупностью  $10...20 \text{ мм}$ , пустотностью  $0,43$ , насыпной плотностью  $1,380...1,400 \text{ г/см}^3$ , истинной плотностью  $2,3 \text{ г/см}^3$ . Химический состав металлургического шлака приведен в табл. 1.

Таблица 1

*Химический состав металлургического шлака ВТЗ*

| Наименование материала                    | CaO   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  |
|-------------------------------------------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|
| Металлургический шлак ВТЗ (фр. 0...20 мм) | 24,5  | 18,9             | 12,2                           | 22,1                           | 11,5 |
| Металлургический шлак ВТЗ (фр. 0...10 мм) | 18,98 | 25,7             | 4,9                            | 13,8                           | 13,8 |
| Металлургический шлак ВТЗ (отсев)         | 21,2  | 20,8             | 14,7                           | 25,4                           | 13,5 |

Цвет шлака крупной фракции преимущественно серый, со светло-серым налетом, наблюдаются области высокой отражательной способности, обладающие металлическим блеском (рис. 1). Макроструктура шлака пористая, отмечается наличие закристаллизованной стекловидной составляющей. Частицы включений имеют окраску от бесцветной до бурой. Бурые включения свидетельствуют о наличии оксидов железа.

В соответствии с программой исследовательской работы шлак предварительно измельчался на лабораторной конусно-инерционной дробилке. Насыпная плотность после помола составила 1,1...1,3 г/см<sup>3</sup>, удельная поверхность измельченного шлака варьировалась от 3001 до 4796 см<sup>2</sup>/г. Параметры оптимального измельчения подбирались экспериментально (рис. 2). Полученный таким образом шлаковый микронаполнитель (ШМН) использовали в составах высоконаполненного мелкозернистого бетона [2].

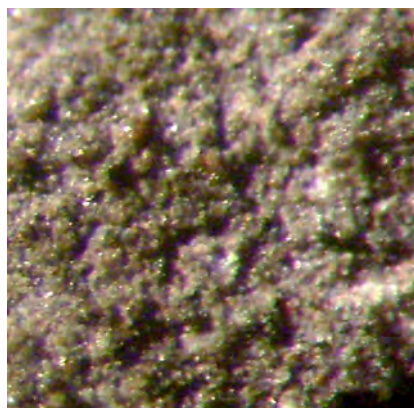


Рис. 1. Микроскопическое изображение поверхности частицы металлургического шлака фр. 0...20 мм

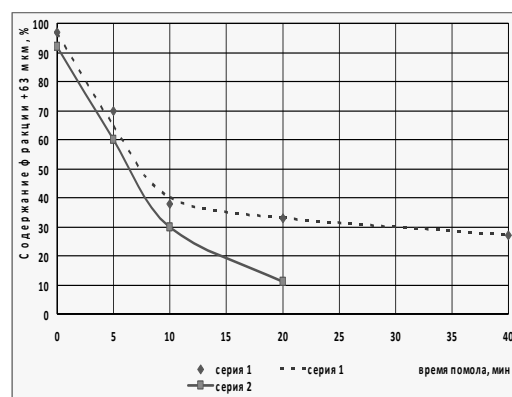


Рис. 2. Зависимость остатка на сите 0063 продукта помола от времени измельчения

Плотность, пористость, водопоглощение, прочность, морозостойкость и, как следствие, долговечность мелкозернистого бетона зависят от степени уплотнения бетонной смеси и технологических приемов ее изготовления. Вибрация — один из основных способов уплотнения бетонной смеси. Двухчастотное виброуплотнение высоконаполненного мелкозернистого бетона (ВНМЗБ) с использованием шлакового микронаполнителя (ШМН) позволяет получить бетонные смеси с улучшенными техническими характеристиками.

Колебательная энергия двухчастотного уплотнения позволяет перегруппировать зерна заполнителя кварцевого песка, а фракционность измельченного шлакового наполнителя позволяет достичь максимально плотной упаковки частиц цементного теста на стадии приготовления бетонной смеси.

Результаты экспериментов по оценке влияния шлакового микронаполнителя (ШМН) на прочностные свойства высоконаполненных мелкозернистых бетонов (ВНМЗБ) [2] показывают целесообразность использования этого материала в составах ВНМЗБ. Введение ШМН оказывает определенное влияние на прочностные характеристики ВНМЗБ не только напрямую при участии ШМН в процессах структурообразования цементного камня, но и косвенно через максимальное насыщение цемента наполнителем. К числу активизирующих факторов в высоконаполненной гетерогенной дисперсной системе ВНМЗБ наряду с гранулометрическим составом наполнителей можно отнести и параметры виброуплотнения мелкозернистого высоконаполненного бетона. Варьируя этими факторами, можно целенаправленно управлять процессами структурообразования и свойствами ВНМЗБ при разработке его технологии [1].

В первой серии образцов ВНМЗБ использовалось соотношение цемента и микронаполнителя 1:1. Вибрационная установка производит двухчастотное уплотнение: верхнее — 12 600 кол/мин, нижнее — 3000 кол/мин (рис. 3).

При двухчастотном режиме вибрационного уплотнения композиции (см. рис. 3) была получена прочность ВНМЗБ при сжатии (кубиковая, 28 сут.) 117 МПа и средняя плотность 2345 кг/м<sup>3</sup>. Прочность при изгибе (28 сут.) составила 7,0 МПа.

Величина прироста прочностных характеристик ВНМЗБ в возрасте от 28 до 180 суток составила для прочности на сжатие 15 %, для прочности при изгибе — 20 % [2].

Для оптимизации параметров технологии изготовления ВНМЗБ с использованием двухчастотного вибрационного уплотнения представляется целесообразным определение влияния соотношения цемента и ШМН 1:0,5, 1:0,3, 1:0,8 на физико-механические характеристики мелкозернистого бетона, наполненного тонкомолотым металлургическим шлаком.

В табл. 2 представлены физико-механические характеристики ВНМЗБ при различном соотношении вяжущего и шлакового микронаполнителя.

Тенденция роста физико-механических показателей ВНМЗБ прослеживается с увеличением содержания шлакового микронаполнителя. При соотношении 1:0,8 и до 1:1 наблюдается тенденция стабилизации показателей.

Формирование плотной структуры ВНМЗБ при двухчастотном вибрационном уплотнении связано не только с упорядочением расположения частиц ШМН в жестком каркасе из зерен кварцевого песка, но и с максимальным заполнением пустот в цементном вяжущем частицами ШМН, а также пустот в цементирующей пленке конгломератов (рис. 4).



Рис. 3. Вибрационная установка

Таблица 2

*Физико-механические характеристики высоконаполненного мелкозернистого бетона в зависимости от соотношения вяжущего и шлакового микронаполнителя в композиции*

| Физико-механические характеристики   | Соотношение Ц:ШМН |       |       |       |      |
|--------------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|------|
|                                      | 1:0               | 1:0,3 | 1:0,5 | 1:0,8 | 1:1  |
| Прочность при сжатии, МПа            | 20,0              | 25,6  | 26,8  | 27,6  | 28,0 |
| Прочность при изгибе, МПа            | 3,8               | 4,5   | 4,6   | 4,9   | 5,5  |
| Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup> | 2120              | 2254  | 2298  | 2320  | 2343 |

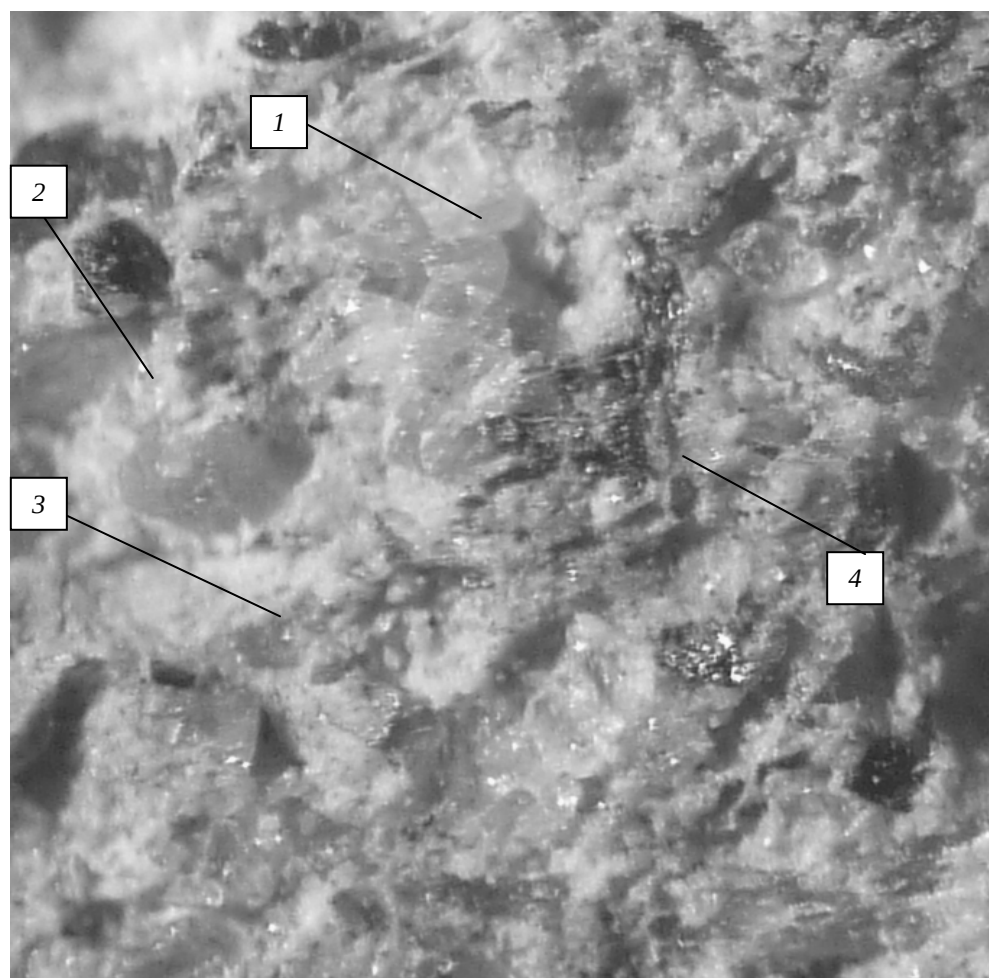


Рис. 4. Микроструктура высоконаполненного мелкозернистого бетона (Ц:ШМН 1:1): 1 — кварцевый наполнитель; 2 — поровое пространство; 3 — цементный камень; 4 — ШМН

Микроскопические исследования структуры образцов высоконаполненного мелкозернистого бетона при Ц:ШМН 1:1 проведены методами оптической металлографии на оптических микроскопах марки МБС-9, МБС-10 (см. рис. 4) [3].

Время вибрационного уплотнения варьировалось от 10 до 30 с. Изменение частоты колебаний при виброуплотнении считаем нецелесообразным, так как зерна песка при двухчастотном уплотнении (верхнее — 1200 кол/мин, нижнее — 3000 кол/мин) уже сблизилось на расстояние, соизмеримое с размером частиц заполнителя при сдвиге структурных кластеров в единичной матричной фазе на момент прекращения вибрационного воздействия. Перемещению подверглись также и частицы шлакового микронаполнителя, что снизило толщину сферы из цементной пленки вокруг микрочастиц ШМН при обдире во время виброколебаний и уменьшило расстояние между ними (см. рис. 4). Структура такой композиции ВНМЗБ имеет среднюю плотность  $2345 \text{ кг/м}^3$ , такой плотности способствует высокое наполнение композиции тонкомолотым шлаковым наполнителем.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хирис Н. С., Потапов А. А., Акчури Т. К. Высоконаполненный мелкозернистый бетон с использованием микронаполнителя из измельченных отходов металлургии // Социально-экономические и технологические проблемы развития строительного комплекса региона. Наука. Практика. Образование : материалы IV Российской научн.-техн. конф. с международным участием. Волгоград, 2011. С. 207—212.

2. Федосов С. В., Акулова А. В., Краснов А. М. Высокопрочные мелкозернистые бетоны для сборных плит автомобильных дорог. Иваново : ИГАСУ, 2008. 196 с.

3. Каприелов С. С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой ультрадисперсных материалов // Бетон и железобетон. 1995. № 3. С. 16—20.

1. Khiris N. S., Potapov A. A., Akchurin T. K. Vysokonaplnennyy melkozernistyy beton s ispol'zovaniem mikronaplnitelya iz izmel'chennykh otkhodov metallurgii // Sotsial'no-ekonomicheskie i tekhnologicheskie problemy razvitiya stroitel'nogo kompleksa regiona. Nauka. Praktika. Obrazovanie : materialy IV Rossiyskoy nauchn.-tekhn. konf. s mezhdunarodnym uchastiem. Volgograd, 2011. S. 207—212.

2. Fedosov S. V., Akulova A. V., Krasnov A. M. Vysokoprochnye melkozernistye betony dlya sbornykh plit avtomobil'nykh dorog. Ivanovo : IGASU, 2008. 196 s.

3. Kaprielov S. S. Obshchie zakonomernosti formirovaniya struktury tsementnogo kamnya i betona s dobavkoy ul'tradispersnykh materialov // Beton i zhelezobeton. 1995. № 3. S. 16—20.

© Хирис Н. С., Акчури Т. К., 2014

Поступила в редакцию  
в декабре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Хирис Н. С., Акчури Т. К. Формирование внутренней структуры мелкозернистого бетона высокой плотности и прочности при наполнении металлургическим шлаком и двухчастотном виброуплотнении // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 121—125.

УДК 620.172.212

***Н. Н. Черноусов, Р. Н. Черноусов, А. В. Суханов, Б. А. Бондарев***

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ АНКЕРОВКИ ГЛАДКОЙ ФИБРОВОЙ АРМАТУРЫ В ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОМ РАСТВОРЕ**

С целью определить модель, наиболее близко отражающую реальную работу гладкой фибры в цементно-песчаном растворе, а также для решения ряда статически неопределимых, температурных и других задач, связанных с перераспределением напряжений в материалах и конструкциях, были проведены исследования по выдергиванию фибры из матрицы бетона. Приведены результаты испытаний, анализ эмпирических кривых, качественные и количественные модели, анализирующие скалывающие напряжения, возникающие в прямой фибре поперек фиброматричной поверхности, а также подобраны зависимости, позволяющие наиболее достоверно описывать работу гладкой стальной фибры в матрице цементно-песчаного бетона.

**Ключевые слова:** гладкая фибра, анкеровка, моделирование, касательные напряжения, адгезия, сила трения.

In order to determine the model that most closely reflects the real work in a plain fibrous cement-sand mortar, as well as to address some statically indeterminate, temperature and other tasks associated with the redistribution of stresses in materials and structures, studies were conducted on fiber pullout from the matrix of the concrete. The results of the tests, the analysis of empirical curves, qualitative and quantitative models that analyze the spall stresses in the fiber of line across fiber-matrix surface are given, and dependences allowing most reliably describe the performance of plain steel fiber in the matrix of cement-sand concrete are selected.

**Key words:** plain fiber, anchorage, modeling, shear stresses, adhesion, friction force.

Работа композитов в сталефибробетоне (СФБ) регулируется суммарным вкладом механики взаимодействия фибр с матрицей бетона. Если все механизмы, участвующие в работе композитных материалов, описать теоретически, то это позволит описывать работу всей конструкции, используя лишь аналитические выражения микромеханики выдергивания стальной фибры из матрицы. Полезность такого подхода обусловлена возможностью оптимизировать сочетание типов фибры и бетонной матрицы. Все это объясняет сравнительно большое число исследований, проведенных в последнее время для того, чтобы создать подходящие методы испытаний, а также модели, описывающие работу фибры в бетоне.

В настоящее время не существует идеальной системы тестирования и моделирования, позволяющей полностью предсказывать механику поведения композитов даже в случае одноосного растяжения. Тем не менее результаты тестов и выводы из экспериментов всегда можно использовать для качественного сравнения типов фибр, их геометрических характеристик и типов бетонных матриц [1, 2].

Основное требование к любой модели — она должна обеспечивать возможность воспроизвести наблюдаемый процесс, из которого были получены параметры для этой модели.

С целью определить модель, наиболее близко отражающую реальную работу гладкой фибры в цементно-песчаном растворе, а также для решения ряда статически неопределимых, температурных и других задач, связанных с перераспределением напряжений в материалах и конструкциях, были прове-

дены исследования по выдергиванию фибры из матрицы бетона. Испытания проводились в специально разработанном устройстве [3], позволяющем определять перемещение гладкой фибры при выходе из бетонной матрицы при растяжении и осуществлять квазистатическое нагружение. Опытные образцы и экспериментальная установка приведены на рис. 1—3.

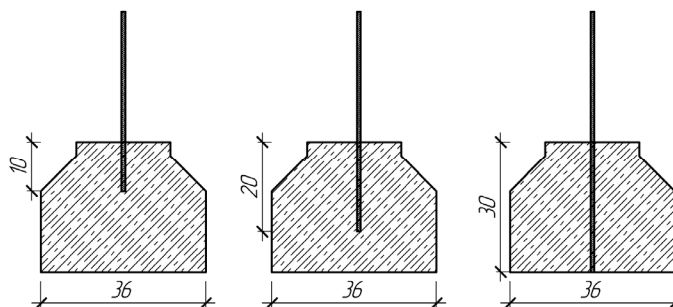


Рис. 1. Опытные образцы

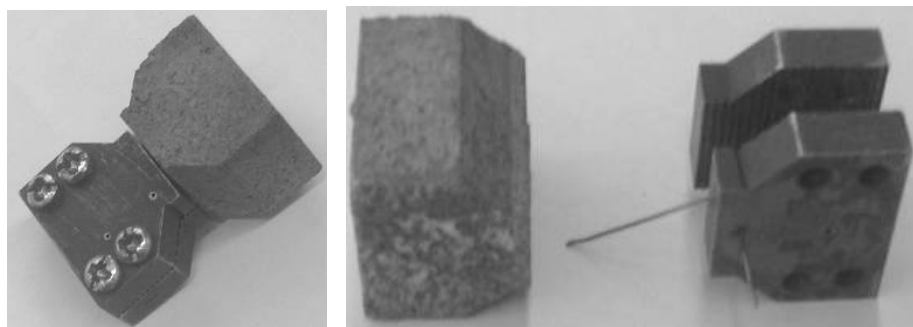


Рис. 2. Закрепление свободного конца фибры



Рис. 3. Экспериментальная установка

Испытывались двенадцать серий по три образца в каждой, в которых варьировалось отношение цемента к песку (Ц/П) 1:1, 1:1,5, 1:2, 1:3 соответственно.

Для изготовления образцов использовался цемент марки ПЦ-500 D0 Липецкого цементного завода и кварцевый песок Стебаевского карьера с модулем крупности  $M_{кр} = 1,9...2,1$ . Водоцементное отношение составляло 0,4...0,5. В проведенных исследованиях в качестве волокна использовалась гладкая проволока фибры «Драмикс» бельгийской фирмы «Бекарт», диаметром 0,8 мм, с временным сопротивлением разрыву  $R_f = 800$  МПа. Длина заделки стального волокна составляла 10, 20 и 30 мм для каждого типа МЗБ.

Эмпирические кривые зависимости сдвига волокна от приложенной нагрузки представлены на рис. 4.

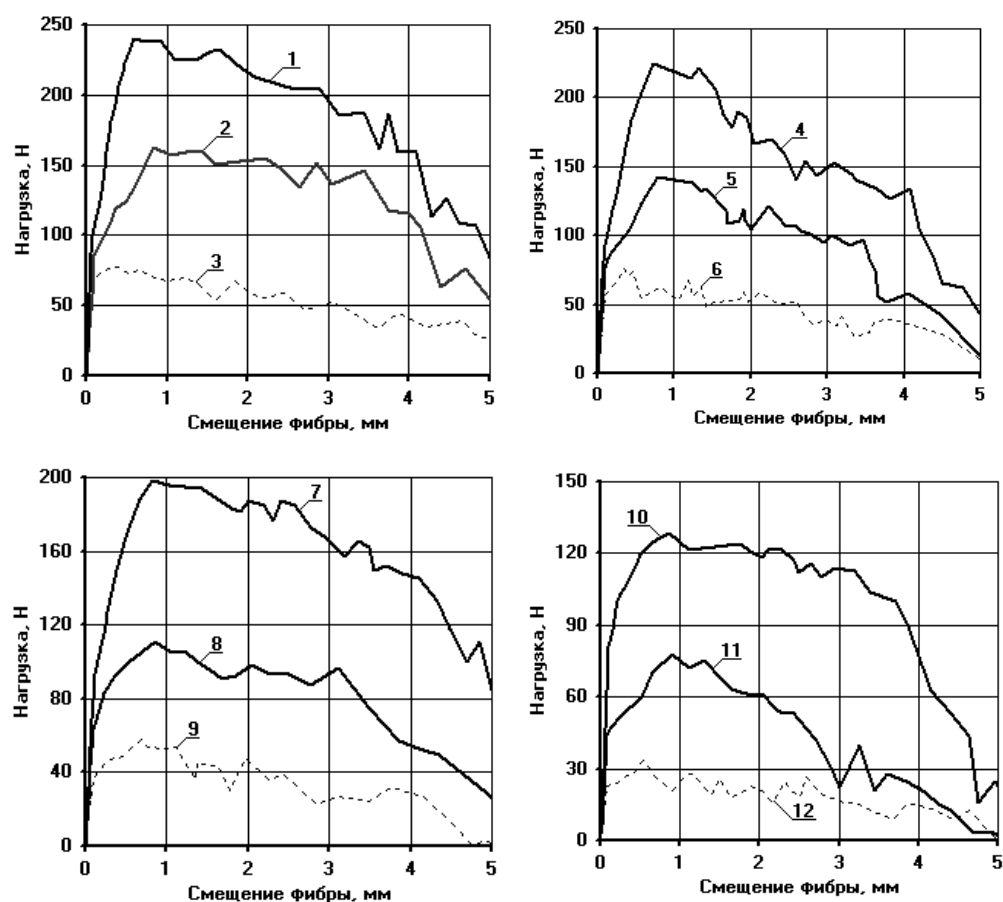


Рис. 4. Экспериментальные зависимости «усилие — перемещение» загруженного конца фибры: цифрами обозначены номера серий испытаний

Для определения распределения напряжения между фиброй и матрицей разработаны качественные и количественные модели, анализирующие скалывающиеся напряжения, возникающие в прямой фибре поперек фибро-матричной поверхности. Данные модели обычно используют в качестве аналитического решения для имитации процесса фибро-матричного взаимодействия. Подобные аналитические схемы служат основой для прогнозирования эффективности фибры в рассматриваемом композите, который обычно армируется короткой и случайно распределенной фиброй.



На первых стадиях нагружения взаимодействие фибры с бетоном является упругим. Первая аналитическая модель, описывающая перераспределение напряжений в упругой зоне, была разработана Коксом (Cox) [2, 4]. Последующие модели основываются на схожих концепциях, но отличаются только некоторыми числовыми параметрами. Эти модели обычно основываются на анализе зоны напряжений вокруг концов фибры, закрепленной в упругой матрице, и применяются для описания работы волокна, полностью находящегося в матрице бетона до появления трещины.

Некоторые модели рассматривают выдергивание гладкой фибры из матрицы бетона, основываясь на теории задержки сдвига вплоть до разрыва связи и фрикционного скольжения фибры. Одна из таких моделей предложена Гресгзуком (Greszczuk) [5], который вывел зависимость для касательных напряжений  $\tau(x)$ , распределенных вдоль волокна фибры, на которую действует внешняя нагрузка  $P$ .

Равновесие сил, действующих на элемент  $dx$  (рис. 5) волокна, записывается в виде

$$N - (N + dN) + 2\pi r \tau dx = 0 \quad (1)$$

или

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi r \tau, \quad (2)$$

где  $N$  — нагрузка на фибру;  $r$  — радиус фибры;  $\tau$  — касательное напряжение вдоль поверхности фибры.

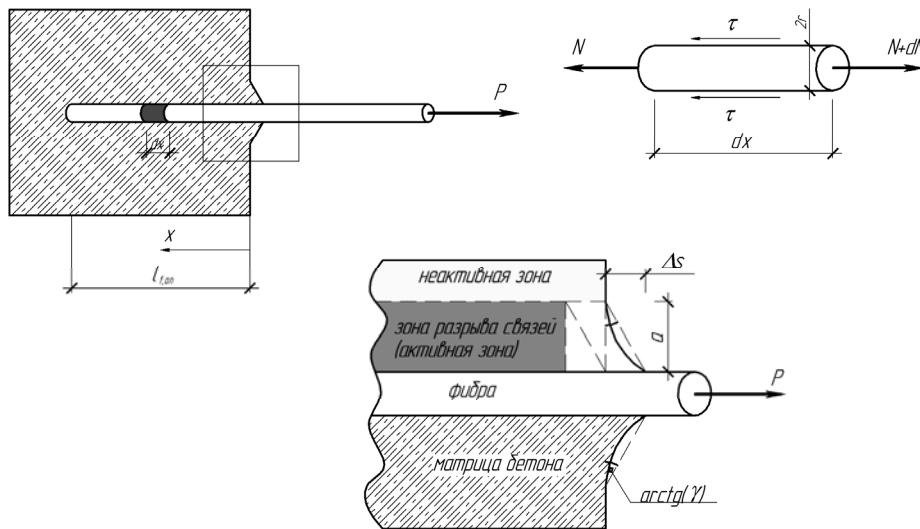


Рис. 5. Схема нагружения гладкой фибры в матрице бетона

Относительное удлинение элемента  $dx$  определяется из выражения

$$\varepsilon = \frac{d(\Delta s)}{dx} = \frac{N}{\pi r^2 E_f}. \quad (3)$$

Угол сдвига матрицы  $\gamma$  равен

$$\gamma = \frac{\Delta s}{a}, \quad (4)$$

где  $\Delta s$  — величина абсолютного сдвига матрицы;  $a$  — ширина слоя матрицы, в котором осуществляется сдвиг в окрестности гладкого волокна (активный слой).

Известно, что величина относительного сдвига пропорциональна напряжениям  $\tau$ , возникающим в активном слое матрицы

$$\tau = G_m \gamma, \quad (5)$$

где  $G_m$  — модуль упругости при сдвиге бетонной матрицы.  
Следовательно,

$$\tau = G_m \frac{\Delta s}{a}. \quad (6)$$

Подставляя выражение для  $\tau$  из (6) в (2), получим

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi r G_m \frac{\Delta s}{a}. \quad (7)$$

Продифференцируем обе части полученного выражения по  $x$

$$\frac{d^2 N}{dx^2} = \frac{2\pi r G_m}{a} \frac{d(\Delta s)}{dx} = \frac{2\pi r G_m}{a} \frac{N}{\pi r^2 E_f} = \frac{2G_m}{arE_f} N.$$

Решая дифференциальное уравнение вида

$$N'' - \beta^2 N = 0, \quad (8)$$

где

$$\beta = \sqrt{\frac{2G_m}{arE_f}}, \quad (9)$$

получим

$$N = C_1 sh(\beta x) + C_2 ch(\beta x), \quad (10)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — константы, которые можно вывести из условия: при  $x = 0$ ,  $N = P$ ; при  $x = l_{f,an}$ ,  $N = 0$ ;  $l_{f,an}$  — длина заделки фибры,  $E_f$  — модуль упругости фибры.

С учетом этих дополнительных условий и (5), окончательное выражение для касательных напряжений в точке  $x$  будет представлено в виде

$$\tau = \frac{P\beta}{2\pi r} (sh(\beta x) - ch(\beta l_{f,an}) ch(\beta x)). \quad (11)$$

Понимание механизмов, ответственных за распределение напряжений вдоль поверхности волокна, позволяет отыскать основу для прогнозирования поведения кривой зависимости деформаций от напряжения в композите, а также в самой трещине.

Такие свойства, как предельная прочность и деформация композита, возможно определить именно посредством модели распределения напряжений. Переход от распределения пластических напряжений к распределению фрикционных напряжений происходит в момент, когда поверхностные касательные напряжения возникают по причине того, что нагрузка превышает прочность на скалывание матрицы от фибры. Такая прочность носит название адгезионной прочности связи на скалывание и обозначается  $\tau_{au}$ . Как только это напряжение будет превышено, происходит разрыв связи между матрицей и фиброй, а фрикционное касательное напряжение начнет действовать поперек плоскости поверхности в зоне разрыва связи. Максимальное фрикционное касательное напряжение (т. е. фрикционная прочность на сдвиг), которое может возникнуть поперек поверхности фибры, обозначается  $\tau_{fu}$ . Величины  $\tau_{au}$  и  $\tau_{fu}$  необязательно совпадают. Значение  $\tau_{fu}$  очень чувствительно к нормальным напряжениям; во множестве аналитических моделей данная величина принимается за константу на протяжении всей стадии выхода фибры из матрицы, идеализируя кривую зависимости смещения волокна от поверхностных касательных напряжений. На практике, однако, значение величины  $\tau_{fu}$  может уменьшиться на поздних стадиях нагружения (разупрочнение при смещении) или увеличиться (упрочнение при смещении), в зависимости от природы взаимодействия и трещин, возникающих поперек плоскости поверхности во время процесса вытягивания фибры.

Один из вариантов комбинированного перераспределения напряжений был аналитически исследован Лоренсом (Lawrence) [6]. Он также рассматривает фрикционное напряжение в зоне разрыва связи. Допуская, что фрикционное скольжение происходит при постоянном значении касательных напряжений  $\tau_{fu}$ , эпюра распределения фрикционных напряжений вдоль поверхности фибры при разрыве связи будет иметь вид, представленный на рис. 6.

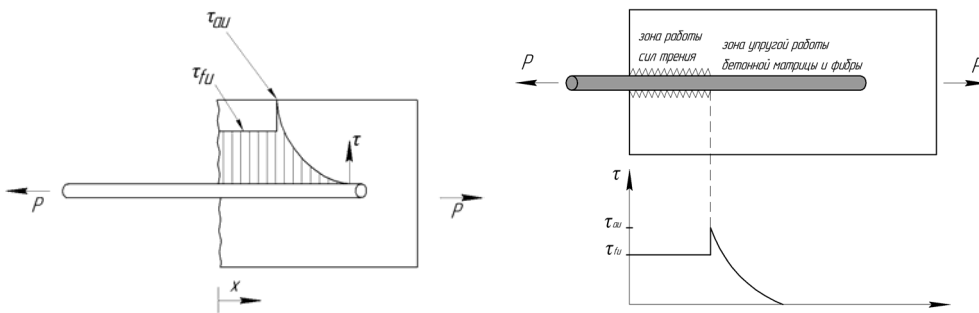


Рис. 6. Распределение касательных напряжений вдоль поверхности фибры

В точке, где заканчивается зона разрыва связи, нагрузка на фибру  $P_f$  будет равна внешней нагрузке  $P$  за вычетом нагрузки, которую компенсирует фрикционное сопротивление в зоне разрыва связи:

$$P_f = P - \pi d_f b \tau_{fu}, \quad (12)$$

где  $d_f$  — диаметр фибры;  $b$  — длина зоны разрыва связи.

Далее этой точки распределение напряжений является упругим и может быть определено, предполагая, что длина фибры равна  $(l_f - b)$  и внешняя нагрузка равна  $P_f$ .

Зависимости, предложенные Лоренсом, были использованы Бартосом (Bartos) для построения модели работы гладкой фибры в бетоне [7]. Он предложил описывать диаграмму «нагрузка — сдвиг» посредством характерных точек, полученных посредством анализа эмпирических кривых вывода гладкой фибры из бетона. Диаграммы, предложенные Бартосом, являются кусочно-линейными и имеют различный вид в зависимости от величины отношения  $\tau_{fu}/\tau_{au}$ .

Анализ эмпирических кривых, полученных нами, позволяет выделить следующие характерные точки диаграммы:

1. Точка  $E$ .  $P_e$  — сила, при которой начинается разрушение упругих связей. При данной нагрузке график меняет свой уклон.

2. Точка  $M$ .  $P_{max}$  — максимальная вытягивающая нагрузка, при которой фибра выходит из матрицы. Резкое убывание графика после достижения максимальной нагрузки означает завершение процесса разрушения связи. Нагрузка  $P_{max}$  обеспечена трением части фибры, которая еще не вышла из матрицы:

$$P_{max} = \pi d_f l_{f, an} \tau_{fu}. \quad (13)$$

На отрезке  $EM$  вдоль поверхности фибры имеет место комбинация фрикционных и адгезионных касательных напряжений, действующих в активной зоне бетонной матрицы.

Убывание графика после точки  $M$  является результатом фрикционного сопротивления при выходе фибры из матрицы, когда длина заделанной части непрерывно уменьшается. Этот участок характеризуется скачкообразным характером перемещения, который наблюдается при вытягивании упругой фибры из хрупкой матрицы. В результате этот участок графика обычно имеет ломаный вид (рис. 7).

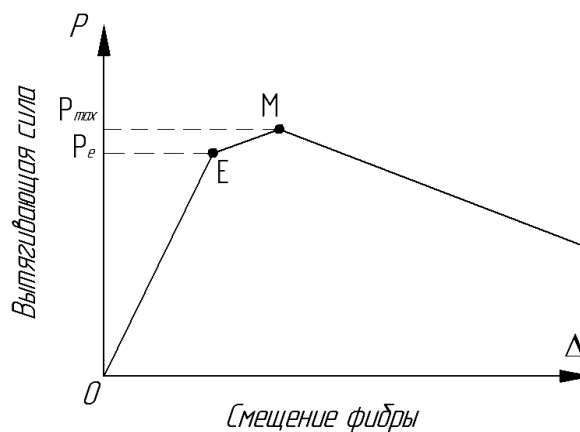


Рис. 7. Кусочно-линейная диаграмма вывода гладкой фибры из матрицы бетона

Эпюры распределения напряжений вдоль поверхности фибры на разных стадиях нагружения представлены на рис. 8.

В табл. представлены значения  $\tau_{au}$  и  $\tau_{fu}$  для разных серий испытаний при различных значениях вытягивающей силы  $P$ .

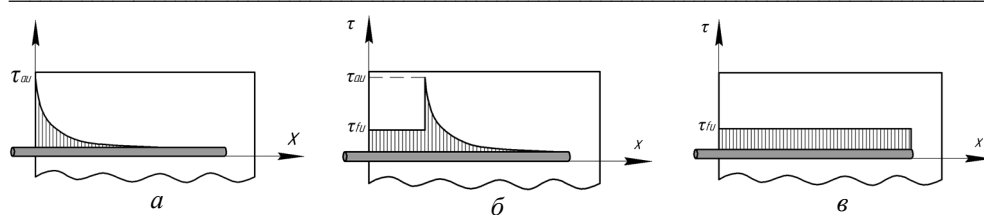


Рис. 8. Эпюры распределения напряжений вдоль поверхности фибры на разных стадиях нагружения: *а* — в точке *Е*; *б* — на отрезке *ЕМ*; *в* — в точке *М*

Значения  $\tau_{au}$  и  $\tau_{fu}$  для разных серий испытаний

| № серии | Ц/П   | Длина заделки $l_{f, an}$ , мм | $P_e$ , Н | $P_{max}$ , Н | Максимальное значение $\tau_{au}$ , МПа | $\tau_{fu}$ , МПа |
|---------|-------|--------------------------------|-----------|---------------|-----------------------------------------|-------------------|
| 1       | 1:1   | 30                             | 100,00    | 240,63        | 5,43                                    | 3,18              |
| 2       |       | 20                             | 86,30     | 162,86        | 5,39                                    | 3,24              |
| 3       |       | 10                             | 70,40     | 76,61         | 5,33                                    | 3,05              |
| 4       | 1:1,5 | 30                             | 92,67     | 224,92        | 3,41                                    | 2,97              |
| 5       |       | 20                             | 75,60     | 142,21        | 3,55                                    | 2,83              |
| 6       |       | 10                             | 57,46     | 69,10         | 3,23                                    | 2,75              |
| 7       | 1:2   | 30                             | 93,27     | 198,20        | 2,97                                    | 2,63              |
| 8       |       | 20                             | 63,16     | 111,59        | 2,85                                    | 2,22              |
| 9       |       | 10                             | 37,25     | 57,80         | 2,78                                    | 2,30              |
| 10      | 1:3   | 30                             | 81,25     | 128,17        | 1,85                                    | 1,70              |
| 11      |       | 20                             | 43,77     | 77,90         | 1,80                                    | 1,55              |
| 12      |       | 10                             | 23,16     | 33,93         | 1,73                                    | 1,35              |

Данные, приведенные в табл., позволяют сделать вывод о том, что зависимости, предложенные Гресгзуком, вполне подходят для построения кривых сдвига гладкой стальной фибры из матрицы мелкозернистого цементно-песчаного бетона. В то же время метод для анализа кривых, предложенный Бартосом, позволяет с высокой точностью определять значения фрикционных и адгезионных касательных напряжений, действующих вдоль поверхности гладкой фибры в матрице бетона.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Balaguru, Perumalsamy N., Shah S. P. Fiber-Reinforced Cement Composites. New York : McGraw-Hill, 1992. 530 p.
2. Bentur A., Mindess S. Fibre Reinforced Cementitious Composites. Second edition. New York, USA, Taylor & Francis, 2007. 604 p.
3. Черноусов Н. Н., Черноусов Р. Н., Суханов А. В. Моделирование прочностных и деформативных свойств мелкозернистого цементно-песчаного бетона при осевом растяжении и сжатии // Строительные материалы. 2013. № 10. С. 12—14.
4. Cox H. L. The elasticity and strength of paper and other fibrous materials. Br. J. Appl. Phys. 3, 1952. P. 72—79.
5. Greszczuk L. B. Theoretical studies of the mechanics of the fibre-matrix interface in composites, in Interfaces in Composites. American Society for Testing and Materials, ASTM STP 452. Philadelphia : PA, 1969. P. 42—58.
6. Lawrence P. Some theoretical considerations of fibre pull-out from an elastic matrix. J. Mater. Sci. 7, 1972. P. 1—6.
7. Bartos P. Review paper: bond in fibre reinforced cements and concretes. Int. J. Cem. Comp. & Ltwt. Concr. 3, 1981. P. 159—177.

1. *Balaguru, Perumalsamy N., Shah S. P.* Fiber-Reinforced Cement Composites. New York : McGraw-Hill, 1992. 530 p.
2. *Bentur A., Mindess S.* Fibre Reinforced Cementitious Composites. Second edition. New York, USA, Taylor & Francis, 2007. 604 p.
3. *Chernousov N. N., Chernousov R. N., Sukhanov A. V.* Modelirovanie prochnostnykh i deformativnykh svoystv melkozernistogo tsementno-peschanogo betona pri osevom rastyazhenii i szhatii // *Stroitel'nye materialy*. 2013. № 10. S. 12—14.
4. *Cox H. L.* The elasticity and strength of paper and other fibrous materials. *Br. J. Appl. Phys.* 3, 1952. P. 72—79.
5. *Greszczuk L. B.* Theoretical studies of the mechanics of the fibre-matrix interface in composites, in *Interfaces in Composites*. American Society for Testing and Materials, ASTM STP 452. Philadelphia : PA, 1969. P. 42—58.
6. *Lawrence P.* Some theoretical considerations of fibre pull-out from an elastic matrix. *J. Mater. Sci.* 7, 1972. P. 1—6.
7. *Bartos P.* Review paper: bond in fibre reinforced cements and concretes. *Int. J. Cem. Comp. & Ltwt. Concr.* 3, 1981. P. 159—177.

© Черноусов Н. Н., Черноусов Р. Н., Суханов А. В., Бондарев Б. А., 2014

*Поступила в редакцию  
в декабре 2013 г.*

*Ссылка для цитирования:*

Моделирование анкеровки гладкой фибровой арматуры в цементно-песчаном растворе / Н. Н. Черноусов, Р. Н. Черноусов, А. В. Суханов, Б. А. Бондарев // *Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит.* 2014. Вып. 35(54). С. 126—134.

## **СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА**

УДК 624.042.8

**И. В. Денисов**

### **ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА**

Описана верификация численного решения уравнения математического маятника. Изоляторы маятникового типа широко применяют для сейсмоизоляции сооружений с жесткой конструктивной схемой. Существующие методы расчета основаны на предположении линейной связи восстанавливающей силы и перемещения, что не всегда оправдано. Сравниваются методы решения нелинейного уравнения движения с аналитическим решением уравнения Дуффинга. Решения получены в полярных и декартовых координатах.

**Ключевые слова:** уравнение движения, сейсмоизоляторы, математический маятник, уравнение Дуффинга.

In order to determine the model that most closely reflects the real work in a plain fibrous cement-sand mortar, as well as to address some statically indeterminate, temperature and other tasks associated with the redistribution of stresses in materials and structures, studies were conducted on fiber pullout from the matrix of the concrete. The results of the tests, the analysis of empirical curves, qualitative and quantitative models that analyze the spall stresses in the fiber of line across fiber-matrix surface are given, and dependences allowing most reliably describe the performance of plain steel fiber in the matrix of cement-sand concrete are selected.

**Key words:** equation of motion, seismic isolation, mathematical pendulum, Duffing equation.

Для уменьшения сейсмической нагрузки, передаваемой на здание, применяют различные системы сейсмоизоляции. Наименее изучены кинематические системы сейсмоизоляции. К ним относятся: кинематические фундаменты Ю. Д. Черепинского, фундаменты на тяжах, сферические опоры и некоторые другие, приведенные в Технической информации от 28.05.2004 «Лучшая сейсмоизоляция системы «Маурер» с подвижными изолирующими устройствами для зданий и сооружений». Отличительной особенностью таких изоляторов является гравитационная восстанавливающая сила. Уравнение движения сходно с уравнением движения маятника.

На рис. 1 представлена схема колебания фундамента при сейсмическом воздействии и диаграмма состояния для сейсмоизоляции маятникового типа в относительных координатах.

Горизонтальные колебания при бесконечной жесткости верхнего строения и линейном демпфировании [1]

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + m(g + \ddot{z}_0) \frac{y}{l} \sqrt{1 - \left(\frac{y}{l}\right)^2} = -m\ddot{y}_0, \quad (1)$$

где  $m$  — масса верхнего строения, приходящаяся на один изолятор; точки обозначают дифференцирование по времени;  $c$  — демпфирование;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\ddot{z}_0$  — вертикальная компонента акселерограммы;  $l$  — длина подвеса;  $\ddot{y}_0$  — горизонтальная компонента акселерограммы.

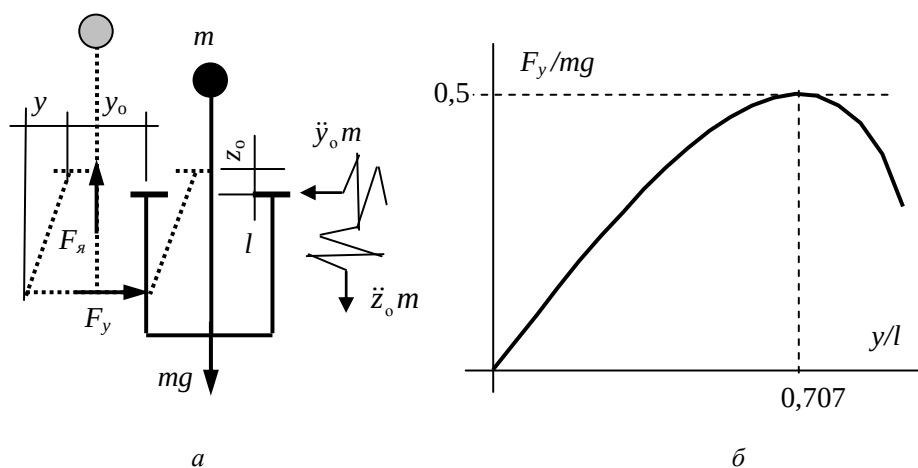


Рис. 1. Схема (а) и диаграмма (б) состояния сейсмоизолятора

Верификацию будем осуществлять в два этапа. На первом этапе сравним метод интегрирования уравнения движения [2] с аналитическим решением уравнения Дуффинга [3]

$$\ddot{y} + \alpha^2 \sin(y) = \beta \sin(x). \quad (2)$$

Постоянные  $\alpha$  и  $\beta$ , входящие в уравнение (2), являются его параметрами, значения которых определяют собой характер колебаний. При  $\beta = 0$  колебания называются свободными, при  $\beta \neq 0$  — вынужденными. Решение строится с помощью степенных рядов.

Аналитическое решение строится с помощью степенных рядов. На оси  $X$  последовательно выбираются точки  $x_0^I, x_0^{II}, x_0^{III}, \dots$  и для окрестности каждой точки строится свой степенной ряд. Схема построения степенного ряда представлена на рис. 2.

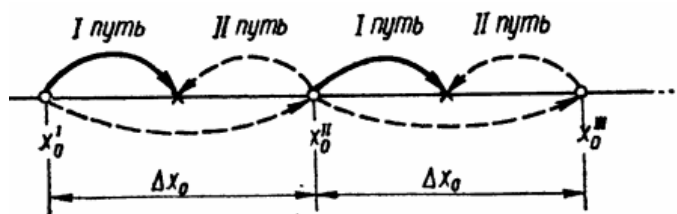


Рис. 2. Схема решения уравнения Дуффинга аналитическим методом



На рис. 3 представлено аналитическое решение уравнения (2) с коэффициентами  $\alpha^2 = 0,5$ ,  $\beta = 1$  и начальными условиями  $\dot{y}(0) = 1$ ,  $\ddot{y}(0) = y(0) = 0$ .

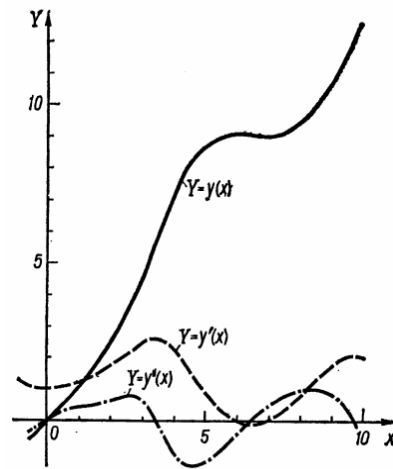


Рис. 3. Аналитическое решение уравнения (2) с коэффициентами  $\alpha^2 = 0,5$ ,  $\beta = 1$  и начальными условиями  $\dot{y}(0) = 1$ ,  $\ddot{y}(0) = y(0) = 0$

Для возможности решения уравнения (2) численным методом представим его в виде [1]

$$\ddot{y} + \alpha^2 \int_0^y \cos(y) dy = \beta \sin(x). \quad (3)$$

На шаге интегрирования уравнение (3) примет вид

$$\Delta \ddot{y} + \alpha^2 \cos(y) \Delta y = \beta [\sin(x + \Delta x) - \sin(x)], \quad (4)$$

где префикс  $\Delta$  обозначает приращение на шаге интегрирования.

Решение уравнения (4), полученное методом Ньюмарка [2], представлено на рис. 4. Там же точками отмечено точное решение.

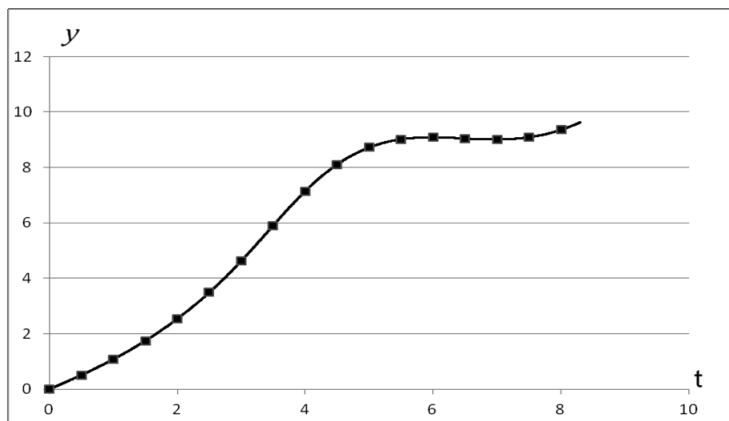


Рис. 4. Решение  $y(t)$  уравнения (2) с коэффициентами  $\alpha^2 = 0,5$ ,  $\beta = 1$  и начальными условиями  $\dot{y}(0) = 1$ ,  $\ddot{y}(0) = y(0) = 0$ , полученное методом Ньюмарка: точками обозначено аналитическое решение

На втором этапе сравним численные решения свободных колебаний математического маятника, полученные в полярных и декартовых координатах.

Уравнение движения математического маятника в полярных координатах при  $l = 1$  и  $m = 1$

$$\ddot{\varphi} + g \sin(\varphi) = 0, \quad (5)$$

тоже уравнение в декартовых координатах

$$\ddot{y} + g y \sqrt{1 - y^2} = 0, \quad (6)$$

где точки обозначают дифференцирование по времени;  $g$  — ускорение свободного падения.

Для интегрирования уравнений шаговым методом воспользуемся методикой [2], тогда уравнения движения преобразуются к виду

$$\ddot{\varphi} + \int_{\varphi(0)}^{\varphi(t)} g \sin(\varphi) d\varphi = 0 \quad (7)$$

и

$$\ddot{y} + g \int_{y(0)}^{y(t)} \frac{1 - 2y^2}{\sqrt{1 - y^2}} dy = 0. \quad (8)$$

Оба уравнения решаются методом Ньюмарка с начальными условиями  $y(0) = 0,3$  и  $\varphi(0) = \arcsin(0,3)$ . На рис. 5 представлены оба решения, приведенные к декартовым координатам.

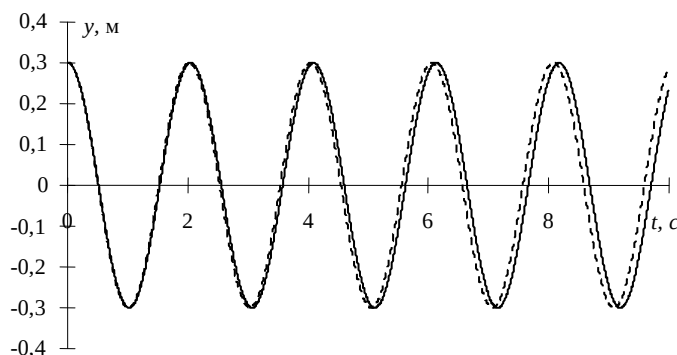


Рис. 5. Решения уравнений (5) (пунктир) и (6) (сплошная)

#### Выводы:

1. При отклонении маятника до  $30^\circ$  результаты решений двух уравнений полностью совпадают.
2. При отклонении на  $45^\circ$  период собственных колебаний увеличивается на 3 % для уравнения (4). Амплитуды колебаний совпадают по двум уравнениям.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Харланов В. Л. Оценка эффективности сейсмоизоляторов // Строительная механика и расчет сооружений. 2013. № 5. С. 62—64.

---

2. Харланов В. Л. Детерминированный анализ металлических каркасов на динамические нагрузки высокой интенсивности : монография. Волгоград, 2006. 134 с.

3. Фильчаков П. Ф. Справочник по высшей математике. Киев : Наукова думка. 1973.

1. Kharlanov V. L. Otsenka effektivnosti seysmoizolyatorov // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. 2013. № 5. S. 62—64.

2. Kharlanov V. L. Determinirovanny analiz metallicheskih karkasov na dinamicheskie nagruzki vysokoy intensivnosti : monografiya. Volgograd, 2006. 134 s.

3. Fil'chakov P. F. Spravochnik po vysshey matematike. Kiev : Naukova dumka. 1973.

© Денисов И. В., 2014

*Поступила в редакцию  
в ноябре 2013 г.*

*Ссылка для цитирования:*

*Денисов И. В. Верификация численного решения уравнения математического маятника // Вестник Волгogr. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 135—139.*

УДК 624.042

**В. А. Игнатьев, В. Н. Ромашкин**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕДУЦИРОВАННОГО СПЕКТРА ЧАСТОТ И ФОРМ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ СИСТЕМ С БОЛЬШИМ ЧИСЛОМ СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ НА ОСНОВЕ СПЛАЙН-КОЛЛОКАЦИОННОЙ КОНДЕНСАЦИИ**

Рассматривается предлагаемый авторами модифицированный вариант статической конденсации для решения неполной алгебраической проблемы собственных векторов и собственных значений, к которой сводятся задачи нахождения нижней части спектра частот свободных колебаний систем с большим числом степеней свободы. Его суть заключается в использовании сплайн-интерполяции значений функции перемещений системы в интервале между выбранными точками коллокации (через значения этой функции в тех же точках коллокации). Это позволяет значительно упростить построение матрицы перехода в методе статической конденсации за счет исключения операции обращения матриц высоких порядков.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** свободные колебания, большое число степеней свободы, редуцирование, сплайн-коллокация.

The authors presented a modified version of the static condensation method to solve the incomplete algebraic eigenvectors and eigenvalues problem for systems with many degrees of freedom. Its essence is to use a spline interpolation of the function of displacement in the range between the selected collocation points (through the values of the function in the same collocation points). The transformation matrix creation process can be significantly simplified by using this approach which eliminates the high order matrix inversion operation.

**К e y w o r d s:** natural vibrations, large number of degrees of freedom, reduction, spline collocation.

***Построение матрицы перехода с использованием сплайн-коллокационной интерполяции.*** Рассмотрим сначала для простоты одномерную функцию дискретного аргумента  $y_i = f(x_i)$ , являющуюся, например, решением задачи расчета конструкции по дискретной расчетной схеме (метод перемещений, МКЭ и т. п.).

При большом числе  $n$  в функции

$$y_i = f(x_i), (i = 0, 1, \dots, n), \quad (1)$$

где  $i$  — номер узла сетки расчетных точек, для получения решения задачи используется переход к разреженной сетке расчетных точек ( $J = 0, 1, \dots, N$ ) (к так называемым главным степеням свободы) (рис. 1).

Самым распространенным способом такого перехода в задачах динамики является метод статической конденсации Гайана [1], основанный на различных модификациях процедур исключения групп неизвестных при решении систем линейных алгебраических уравнений.

В данной работе такой переход выполняется на основе сплайн-коллокационной интерполяции значений функции  $y_i = f(x_i)$  во второстепенных узлах через значения этой функции в главных узлах  $J$  разреженной сетки расчетных точек.

Заменим функцию  $y_i = f(x_i)$  в интервале между узлами коллокации  $J-1, J$ , образующими разреженную сетку, аппроксимирующим сплайном в местной системе координат (рис. 2).

$$S_{(J)}(x) = a_0^{(J)} + a_1^{(J)}x + a_2^{(J)}x^2 + a_3^{(J)}x^3, \quad (2)$$

где индекс  $(J)$  обозначает номер интервала.

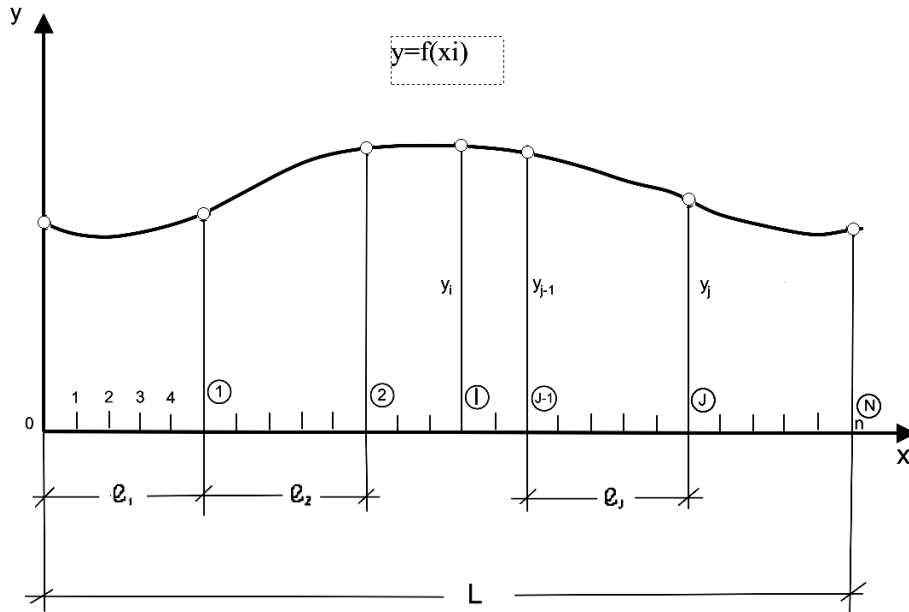


Рис. 1. Исходная и разреженная сетка точек в функции дискретного аргумента

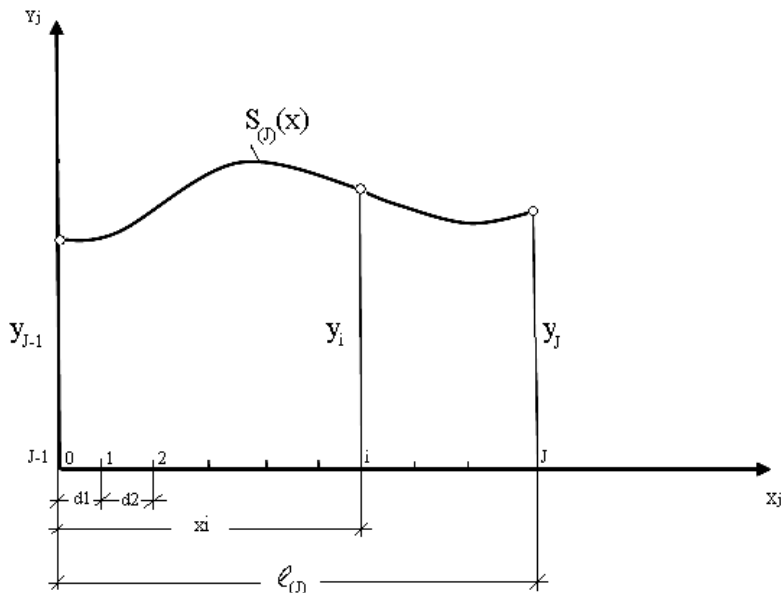


Рис. 2. Сплайн-функция на отрезке  $J-1, J$

Коэффициенты сплайна (2) найдем, используя значения функции  $y_i = \varphi(x_i)$  и ее первой производной

$$y'_i = f'(x_i) = \varphi(x_i) = a_1^{(j)} + 2a_2^{(j)}x + 3a_3^{(j)}x^2 \quad (3)$$

на границах сплайна, т. е. в коллокационных узлах  $J-1, J$ :

$$\begin{aligned} S_{(j)}(x_{j-1}) &= y_{j-1}, S_{(j)}(x_j) = y_j, \\ S'_{(j)}(x_{j-1}) &= \varphi_{j-1}, S'_{(j)}(x_j) = \varphi_j. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставив в (2) и (3)  $x_{j-1} = 0, x_j = l_{(j)}$  в местной системе координат и приравняв выражениям (4), получим систему уравнений, решением которой будут следующие значения коэффициентов:

$$\begin{aligned} a_0^{(j)} &= y_{j-1}, a_1^{(j)} = \varphi_{j-1}, \\ a_2^{(j)} &= -\frac{3}{l_{(j)}^2} y_{j-1} - \frac{2}{l_{(j)}} \varphi_{j-1} + \frac{3}{l_{(j)}^2} y_j + \frac{1}{l_{(j)}} \varphi_j, \\ a_3^{(j)} &= \frac{2}{l_{(j)}^3} y_{j-1} + \frac{1}{l_{(j)}^2} \varphi_{j-1} - \frac{2}{l_{(j)}^3} y_j + \frac{1}{l_{(j)}^2} \varphi_j. \end{aligned} \quad (5)$$

Сплайн (2) после подстановки в него значений коэффициентов по (5) имеет в матричной форме следующий вид для каждого значения  $y_i$ , относящегося ко второстепенному узлу  $i$  сетки в  $J$ -м интервале:

$$\begin{aligned} S_{(j)}(x_i) &= y_i = f(x_i) = [x_{(j)}] [A^{(j)}] \begin{Bmatrix} q_{j-1} \\ q_j \end{Bmatrix}, \\ S'_{(j)}(x_i) &= \varphi_i = f'(x_i) = [x'_{(j)}] [A^{(j)}] \begin{Bmatrix} q_{j-1} \\ q_j \end{Bmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь

$$\begin{aligned} [x_{(j)}] &= [1 \quad x_i \quad x_i^2 \quad x_i^3], \\ [x'_{(j)}] &= [0 \quad 1 \quad 2x_i \quad 3x_i^2], \quad [A^{(j)}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{3}{l_{(j)}^2} & -\frac{2}{l_{(j)}} & \frac{3}{l_{(j)}^2} & \frac{1}{l_{(j)}} \\ \frac{2}{l_{(j)}^3} & \frac{1}{l_{(j)}^2} & -\frac{2}{l_{(j)}^3} & \frac{1}{l_{(j)}^2} \end{bmatrix}, \\ \{q_j\} &= [y_j, \varphi_j]^T \end{aligned} \quad (7)$$

Объединяя выражения (6) для всех  $N$  интервалов отрезка  $L$ , т. е. выполняя стыковку всех сплайнов на их общих границах, получим матрицу перехода от неизвестных  $y_i$  ( $i = 0, 1, \dots, n$ ) к неизвестным  $y_j$  на разреженной сетке узлов коллокации ( $J = 0, 1, \dots, N$ ):

$$[S] = \left\{ \begin{array}{l} \sum_i y_i^{(1)} \\ \sum_i \varphi_i^{(1)} \\ \sum_i y_i^{(2)} \\ \sum_i \varphi_i^{(2)} \\ \dots \\ \sum_i y_i^{(J)} \\ \sum_i \varphi_i^{(J)} \\ \dots \\ \sum_i y_i^{(N)} \\ \sum_i \varphi_i^{(N)} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} [x_{(1)} + x'_{(1)}][A^{(1)}] \\ [x_{(2)} + x'_{(2)}][A^{(2)}] \\ \dots \\ [x_{(J)} + x'_{(J)}][A^{(J)}] \\ \dots \\ [x_{(N)} + x'_{(N)}][A^{(N)}] \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} q_0^{(1)} \\ q_1^{(1)} + q_1^{(2)} \\ q_2^{(2)} + q_2^{(3)} \\ \dots \\ q_J^{(J)} + q_J^{(J+1)} \\ \dots \\ q_{N-1}^{(N-1)} + q_{N-1}^{(N)} \\ q_N^{(N)} \end{array} \right\}. \quad (8)$$

Здесь

$$[x_{(J)} + x''_{(J)}] = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & x_1^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_i & x_i^2 & x_i^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{v-1} & x_{v-1}^2 & x_{v-1}^3 \end{bmatrix}_{(J)} + \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2x_1 & 3x_1^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 1 & 2x_i & 3x_i^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 1 & 3x_{v-1} & 3x_{v-1}^2 \end{bmatrix}_{(J)}, \quad (9)$$

где  $i_{(J)} = 1, 2, \dots, (v-1)$  — номера узлов в пределах локальной нумерации узлов  $J$ -го интервала.

Для двумерных конструкций и соответствующих им решений в виде двумерных функций

$$Z_{ij} = f(x_i, y_j). \quad (10)$$

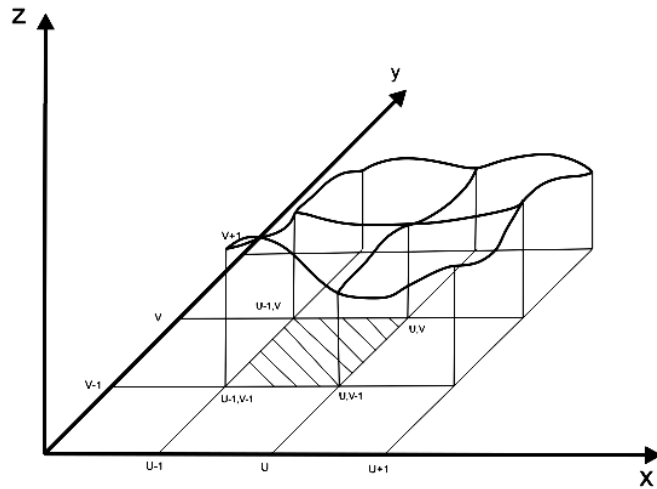
Необходимо использовать двумерные сплайны в виде произведений одномерных сплайнов:

$$S_{(UV)}(x_i, y_j) = S_{(U)}(x_i)S_{(V)}(y_j). \quad (11)$$

На рис. 3 показана вся область, покрываемая сплайном  $S_{(UV)}(x_i, y_j)$ , т. е. область, ограниченная линиями между следующими узлами:

- (U-1, V-1) и (U, V-1),
- (U-1, V) и (U, V),
- (U-1, V-1) и (U-1, V),
- (U, V-1) и (U, V).

В ней все неизвестные  $Z_{ij}$ , связанные со второстепенными степенями свободы, выражаются с помощью сплайна (11) через неизвестные  $Z_{uv}$  в узлах конденсации, связанных с главными степенями свободы системы.

Рис. 3. Двумерный сплайн  $S_{UV}(x, y)$ **Получение конденсированной матрицы жесткости и матрицы масс.**

Получение таких матриц обычно связано с задачей нахождения редуцированного спектра собственных значений и собственных векторов, т. е. частот свободных колебаний и соответствующих им форм, для систем с очень большим числом степеней свободы.

Система алгебраических уравнений метода конечных элементов или метода перемещений, описывающая свободные колебания конструкции по дискретной расчетной схеме, имеет следующий вид:

$$[K - \lambda M]\{q\} = 0, \quad (12)$$

где  $[K]$  — матрица жесткости конструкции;  $\lambda = \omega^2$ ,  $\omega$  — частота свободных колебаний;  $[M]$  — матрица масс;  $\{q\} = [q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n]$  — вектор перемещений узловых масс по направлениям их степеней свободы.

Разделив все степени свободы в соответствии с физическим смыслом задачи на главные и второстепенные, уравнение (12) можно записать в блочной форме

$$\begin{bmatrix} K_{rr} & K_{rs} \\ K_{sr} & K_{ss} \end{bmatrix} - \lambda \begin{bmatrix} M_{rr} & M_{rs} \\ M_{sr} & M_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_r \\ q_s \end{bmatrix} = 0. \quad (13)$$

Здесь индексы «r» относятся к главным степеням свободы, а индексы «s» — ко второстепенным.

В развернутой форме уравнение (13) имеет вид системы из двух уравнений:

$$\begin{cases} (K_{rr}q_r + K_{rs}q_s) - \lambda(M_{rr}q_r + M_{rs}q_s) = 0, \\ (K_{sr}q_r + K_{ss}q_s) - \lambda(M_{sr}q_r + M_{ss}q_s) = 0. \end{cases} \quad (14)$$

При статической конденсации по Гайану пренебрегают влиянием инерционных сил масс, связанных со второстепенными степенями свободы «s». В этом случае из второго уравнения системы (14) следует



$$q_s = -K_{ss}^{-1} K_{sr} q_r = S_r q_r, \quad (15)$$

где  $S_r$  — матрица перехода.

Подставив этот результат в первое уравнение системы (14), получим

$$[K_{rr}^* - \lambda M_{rr}^*] \{q_r\} = 0, \quad (16)$$

где  $K_{rr}^*$  — конденсированная матрица жесткости:

$$K_{rr}^* = K_{rr} - K_{rs} K_{ss}^{-1} K_{sr} = K_{rr} + K_{rs} S_r;$$

$M_{rr}^*$  — конденсированная матрица масс:

$$M_{rr}^* = M_{rr} - M_{rs} K_{ss}^{-1} K_{sr} = M_{rr} + M_{rs} S_r.$$

Построение матрицы перехода  $S_r$  в (15) связано с обращением матрицы  $K_{ss}$ , имеющей также высокий порядок.

Изложенный в п. 1 алгоритм получения матрицы перехода  $S$  не связан с такой операцией и позволяет построить ее по этому же принципу, что и в МКЭ при построении матриц жесткости и масс ансамбля КЭ для всей конструкции.

Преимущество этого алгоритма состоит в том, что конденсация может быть выполнена не ко всей области конструкции, а в отдельных областях, не имеющих особенностей в виде разрывов искомой функции и ее первой производной.

**Получение матрицы масс на разреженной сетке узлов на основе энергетического подхода.** Заменяем точечные массы  $m_i$  в интервале  $J-1, J$  объемными массами с параметрами  $M_{j-1}, J_{p,j-1}$  и  $M_j, J_{p,j}$ .

Точечные и объемные массы на отрезке  $J-1, J$  представлены на рис. 4.

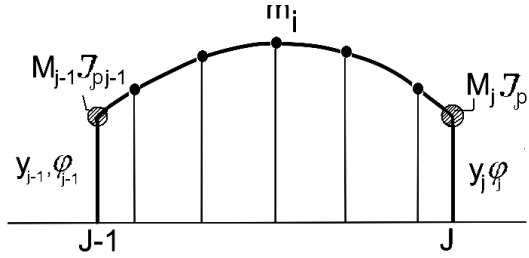


Рис. 4. Точечные и объемные массы на отрезке  $J-1, J$

Величины максимальных инерционных сил в этом и другом случаях определяются выражениями

$$F_i = -m_i \omega^2 y_i, \quad F_J = -M_J \omega^2 y_J, \quad F_{p,J} = -J_{p,J} \omega^2 \phi_J. \quad (17)$$

Тогда соответствующие энергии (работы инерционных сил и инерционных моментов на максимальных амплитудных перемещениях):

$$\mathcal{E}_i = \sum_i \frac{1}{2} m_i \omega^2, \quad \mathcal{E}_J = \frac{1}{2} (M_{j-1} y_{j-1}^2 + J_{p,j-1} \phi_{j-1}^2) + \frac{1}{2} (M_J y_J^2 + J_{p,J} \phi_J^2) \quad (18)$$

должны быть приравнены, т. е.

$$\mathfrak{D}_i = \mathfrak{D}_j. \quad (19)$$

Из этого следует

$$\Phi_i = \sum_i m_i y_i^2 - (M_{j-1} y_{j-1}^2 + J_{p,j-1} \Phi_{j-1}^2 + M_j y_j^2 + J_{p,j} \Phi_j^2) = 0, \quad (20)$$

где  $\Phi_i$  — функционал.

Используя сплайн-аппроксимацию (6), получаем в итоге выражение следующего вида:

$$y_i = a_1^{(i)} y_{j-1} + a_2^{(i)} y_j + a_3^{(i)} \Phi_{j-1} + a_4^{(i)} \Phi_j, \quad (21)$$

где  $a^{(i)}$  — функции от локальных координат  $x_i$  в пределах сплайна  $S_i$ .

Тогда  $y_i^2$  будет иметь вид

$$y_i^2 = d_1^{(i)} y_{j-1}^2 + d_2^{(i)} y_{j-1} y_j + d_3^{(i)} y_{j-1} \Phi_{j-1} + d_4^{(i)} y_{j-1} \Phi_j + d_5^{(i)} y_j^2 + d_6^{(i)} y_j \Phi_{j-1} + d_7^{(i)} y_j \Phi_j + d_8^{(i)} \Phi_{j-1}^2 + d_9^{(i)} \Phi_{j-1} \Phi_j + d_{10}^{(i)} \Phi_j^2, \quad (22)$$

где  $d^{(i)}$  — функции от  $x_i$ .

Тогда

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_i}{\partial y_{j-1}} &= \sum_i m_i (2d_1^{(i)} y_{j-1} + d_2^{(i)} y_j + d_3^{(i)} \Phi_{j-1} + d_4^{(i)} \Phi_j) - 2M_{j-1} y_{j-1} = 0; \\ \frac{\partial \Phi_i}{\partial y_j} &= \sum_i m_i (d_2^{(i)} y_{j-1} + 2d_5^{(i)} y_j + d_6^{(i)} \Phi_{j-1} + d_7^{(i)} \Phi_j) - 2M_j y_j = 0; \\ \frac{\partial \Phi_i}{\partial \Phi_{j-1}} &= \sum_i m_i (d_3^{(i)} y_{j-1} + d_6^{(i)} y_j + 2d_8^{(i)} \Phi_{j-1} + d_9^{(i)} \Phi_j) - 2J_{p,j-1} \Phi_{j-1} = 0; \\ \frac{\partial \Phi_i}{\partial \Phi_j} &= \sum_i m_i (d_4^{(i)} y_{j-1} + d_7^{(i)} y_j + d_9^{(i)} \Phi_{j-1} + 2d_{10}^{(i)} \Phi_j) - 2J_{p,j} \Phi_j = 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Задаваясь возможными формами перемещений, как показано на рис. 5, получим

$$\begin{aligned} M_{j-1} &= \sum_i m_i d_1^{(i)} = \sum_i m_i a_1^2 = \sum_i m_i \left( 1 - \frac{3x_i^2}{l^2} + \frac{2x_i^3}{l^3} \right)^2; \\ M_j &= \sum_i m_i d_5^{(i)} = \sum_i m_i a_2^2 = \sum_i m_i \left( \frac{3x_i^2}{l^2} - \frac{2x_i^3}{l^3} \right)^2; \\ J_{p,j-1} &= \sum_i m_i d_8^{(i)} = \sum_i m_i a_3^2 = \sum_i m_i \left( x_i - \frac{2x_i^2}{l} + \frac{x_i^3}{l^2} \right)^2; \\ J_{p,j} &= \sum_i m_i d_{10}^{(i)} = \sum_i m_i a_4^2 = \sum_i m_i \left( \frac{x_i^2}{l} + \frac{x_i^3}{l^2} \right)^2. \end{aligned} \quad (24)$$

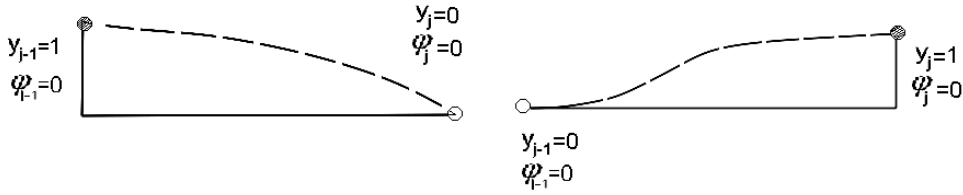


Рис. 5. Возможные формы перемещений

Аналогичным образом происходит получение конденсированной матрицы масс на основе равенства работ инерционных сил на максимальных (амплитудных) перемещениях.

Представим (21) в матричном виде:

$$y_i = [a^{(i)}] \{q_j\}, \quad (25)$$

где  $\{q_j\} = [y_{j-1}, \varphi_{j-1}, y_j, \varphi_j]^T$ .

Тогда работа инерционных сил на максимальных амплитудных перемещениях будет

$$A = \omega^2 \sum_i m_i y_i^2 = \omega^2 \{q_j\} \sum_i [a^{(i)}]^T [m_i] [a^{(i)}] \{q_j\}. \quad (26)$$

Для конденсированной системы

$$A_{cond}^{(j)} = \omega^2 \{q_j\} [M_{cond}] \{q_j\}. \quad (27)$$

Сравнивая (26) и (27), находим

$$[M_{cond}] = \sum_i [a^{(i)}]^T [m_i] [a^{(i)}]. \quad (28)$$

#### Алгоритм сплайн-коллокационной конденсации

*Исходные данные:* исходная сетка узлов конечно-элементной модели с большим числом степеней свободы и соответствующая им система алгебраических уравнений метода конечных элементов или метода перемещений, описывающая свободные колебания конструкции по дискретной расчетной схеме (12).

**1 шаг.** Построение разреженной сетки узлов КЭМ. На данном шаге из исходной сетки узлов выбираются главные степени свободы.

**2 шаг.** Формирование сплайнов. На этом шаге выполняется специальный покрывающий алгоритм: обходятся все выбранные узлы разреженной сетки и между  $k$  ближайшими ст.св. строится сплайн (где  $k$  — количество степеней свободы, необходимых для нахождения всех коэффициентов сплайна). В пределах каждого сплайна должны выполняться условия совместности деформаций и перемещений, поэтому при построении сплайнов должны быть учтены все особенности модели.

**3 шаг.** Редуцирование исходной системы уравнений (12) в систему уравнений разреженной сетки (16) на основе сплайн-преобразования.

Построение редуцированных матриц жесткости и масс выполняется на основе (16). Построение редуцированной матрицы масс также может выполняться другими способами (по принципу статической эквивалентности, на основе энергетического подхода (24), равенства работ инерционных сил (28)).

Последний шаг может быть выполнен отдельно на каждой сплайн-области.

**Численные примеры.** Исследовалась 33-узловая балка с жестко зашеченными краями. Редуцирование матрицы жесткости выполнялось на основе интерполяции по алгоритму МКЭ (16).

Редуцирование матрицы сосредоточенных масс выполнялось по трем вариантам на основе:

вариант 1 — принципа статической эквивалентности (сбор масс по площадям);

вариант 2 — равенства энергий работ инерционных сил (24);

вариант 3 — равенства работ инерционных сил (28).

В табл. 1 приведены результаты вычислений СЗ по предлагаемым схемам.

Предлагаемый метод сплайн-интерполяции по точности нахождения СЗ совпадает с результатами, полученными по методу Гайна.

Точность нахождения СЗ по предлагаемым вариантам сплайн-интерполяции сильно зависит от способа редуцирования матрицы масс.

Выбор узлов коллокации вблизи узлов, имеющих граничные условия, не несет никакой практической пользы.

Наиболее удачным вариантом оказывается редуцирование матрицы масс на основе равенства работ инерционных сил (25)—(28).

Рассмотрим случай обобщенной матрицы масс. Сплайн-интерполяция матрицы масс выполняется в двух вариантах.

Вариант 1 — на основе МКЭ:

$$\begin{aligned} M_{rr}^* &= M_{rr} - M_{rs} K_{ss}^{-1} K_{sr} - K_{rs} K_{ss}^{-1} M_{sr} + K_{rs} K_{ss}^{-1} M_{ss} K_{ss}^{-1} K_{sr} = \\ &= M_{rr} + M_{rs} S_r + S_r^T M_{sr} + S_r^T M_{ss} S_r. \end{aligned} \quad (29)$$

Вариант 2 — на основе равенства работ инерционных сил:

$$M_{rr}^* = M_{rr} + S_r^T M_{ss} S_r. \quad (30)$$

Определим, как влияет порядок исключения масс по разным направлениям степеней свобод на точность нахождения СЗ.

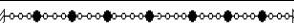
В вышеприведенных вариантах (варианты 1 и 2) интерполяция масс по линейным и по поворотным направлениям выполнялась одновременно.

Рассмотрим случай (вариант 3), когда на первом шаге выполнялось исключение масс по направлению поворотов в каждом узле по методу Гайана, а на втором шаге выполнялась сплайн-интерполяция линейных масс во второстепенных узлах на основе (29). При этом результирующие массы в узлах коллокации содержали как линейную, так и поворотную составляющие.

Рассмотрим случай (вариант 4), когда сплайн-интерполяция матрицы масс осуществлялась отдельно по каждому из направлений степеней свободы. В табл. 2 приводятся сравнительные результаты точности нахождения СЗ по предлагаемым вариантам метода.

Т а б л и ц а 1

## Сравнительные результаты тестирования

| Схема                                                                               | СЗ<br>(МКЭ) | СЗ<br>(Гаян)         | СЗ (сплайн-интерполяция) |                       |                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|
|                                                                                     |             |                      | Вариант 1                | Вариант 2             | Вариант 3            |
|    | 0,00037     | 0,00038<br>(-2,76 %) | 0,00031<br>(18,5 %)      | 0,00041<br>(-9,43 %)  | 0,00038<br>(-2,76 %) |
|    | 0,00037     | 0,00038<br>(-0,21 %) | 0,00037<br>(0,63 %)      | 0,00049<br>(-31,75 %) | 0,00038<br>(-0,21 %) |
|                                                                                     | 0,00285     | 0,00289<br>(-1,48 %) | 0,00268<br>(5,9 %)       | 0,00346<br>(-21,61 %) | 0,00289<br>(-1,48 %) |
|                                                                                     | 0,01094     | 0,01142<br>(-4,44 %) | 0,00809<br>(26,03 %)     | 0,01063<br>(2,858 %)  | 0,01142<br>(-4,44 %) |
|    | 0,00037     | 0,00037<br>(0,013 %) | 0,00037<br>(0,02 %)      | 0,00050<br>(-33,96 %) | 0,00037<br>(-0,01 %) |
|                                                                                     | 0,00285     | 0,00285<br>(-0,1 %)  | 0,00284<br>(0,17 %)      | 0,00377<br>(-32,29 %) | 0,00285<br>(-0,09 %) |
|                                                                                     | 0,01094     | 0,01098<br>(-0,37 %) | 0,01086<br>(0,73 %)      | 0,01417<br>(-29,51 %) | 0,01098<br>(-0,37 %) |
|                                                                                     | 0,02989     | 0,03019<br>(-0,1 %)  | 0,02921<br>(2,23 %)      | 0,03745<br>(-25,3 %)  | 0,03019<br>(-0,99 %) |
|                                                                                     | 0,06669     | 0,06812<br>(-2,13 %) | 0,06267<br>(6,04 %)      | 0,07939<br>(-19,03 %) | 0,06812<br>(-2,13 %) |
|                                                                                     | 0,13009     | 0,13525<br>(-3,96 %) | 0,11175<br>(14,1 %)      | 0,14218<br>(-9,29 %)  | 0,13525<br>(-3,96 %) |
|                                                                                     | 0,23055     | 0,24541<br>(-6,44 %) | 0,16354<br>(29,06 %)     | 0,21447<br>(6,975 %)  | 0,24541<br>(-6,44 %) |
|                                                                                     | 0,23055     | 0,24541<br>(-6,44 %) | 0,16354<br>(29,06 %)     | 0,21447<br>(6,975 %)  | 0,24541<br>(-6,44 %) |
|  | 0,00037     | 0,00038<br>(-0,33 %) | 0,00034<br>(10,4 %)      | 0,00050<br>(-34,06 %) | 0,00038<br>(-0,33 %) |
|                                                                                     | 0,00285     | 0,00291<br>(-2,25 %) | 0,00197<br>(30,6 %)      | 0,00355<br>(-24,69 %) | 0,00291<br>(-2,25 %) |
|                                                                                     | 0,01094     | 0,01128<br>(-3,08 %) | 0,00532<br>(51,34 %)     | 0,00889<br>(18,69 %)  | 0,01128<br>(-3,08 %) |
|  | 0,00037     | 0,00037<br>(-0,02 %) | 0,00038<br>(-0,67 %)     | 0,00051<br>(-35,62 %) | 0,00037<br>(-0,02 %) |
|                                                                                     | 0,00285     | 0,00285<br>(-0,12 %) | 0,00270<br>(5,12 %)      | 0,00367<br>(-29,09 %) | 0,00285<br>(-0,12 %) |
|                                                                                     | 0,01094     | 0,01099<br>(-0,51 %) | 0,00996<br>(8,90 %)      | 0,01395<br>(-27,55 %) | 0,01099<br>(-0,51 %) |
|                                                                                     | 0,02989     | 0,03036<br>(-1,59 %) | 0,02616<br>(12,49 %)     | 0,03835<br>(-28,30 %) | 0,03036<br>(-1,59 %) |
|                                                                                     | 0,06669     | 0,06809<br>(-2,09 %) | 0,04674<br>(29,91 %)     | 0,06946<br>(-4,14 %)  | 0,06809<br>(-2,09 %) |
|                                                                                     | 0,13009     | 0,13973<br>(-7,40 %) | 0,10526<br>(19,08 %)     | 0,15117<br>(-16,20 %) | 0,13973<br>(-7,40 %) |
|                                                                                     | 0,23055     | 0,23798<br>(-3,22 %) | 0,12374<br>(46,33 %)     | 0,17973<br>(22,04 %)  | 0,23798<br>(-3,22 %) |
|                                                                                     | 0,23055     | 0,23798<br>(-3,22 %) | 0,12374<br>(46,33 %)     | 0,17973<br>(22,04 %)  | 0,23798<br>(-3,22 %) |

Результаты снова показывают совпадение в точности вычислений по методам Гайана и сплайн-интерполяции (вариант 1).

Схожие результаты дает вариант 3 с предварительным исключением масс, имеющих незначительную инерционную составляющую по направлению углов поворота.

К преимуществам данной модификации можно отнести следующее:

2. При такой конденсации нет необходимости обращения блока матрицы жесткости всей системы, относящегося ко второстепенным степеням свободы  $K_{ss}^{-1}$ . Эта матрица как правило имеет высокий порядок.

3. По сравнению со ступенчатой ЧДК [2], этот алгоритм не связан с многократным повторением вычисления СЗ для систем с большим числом безынерционных степеней свободы.

4. Главное преимущество: конденсация по областям выполняется независимо друг от друга.

Анализ проведенных численных экспериментов над многопролетными балками показывает совпадение в точности получаемых результатов по модифицированному и классическому вариантам метода. Известно, что в некоторых методах динамической конденсации [2] многократно используют процедуру статической конденсации на своих этапах работы. В дальнейшем применение предложенной модификации может существенно повысить их эффективность в целом.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Guyan R. J. Reduction of Stiffness and Mass Matrices // AIAA Journal. Vol. 3. 1965. № 2. Рр. 380.
2. Игнатьев В. А. Редукционные методы расчета в статике и динамике пластинчатых систем. Саратов, 1992. 142 с.
1. Guyan R. J. Reduction of Stiffness and Mass Matrices // AIAA Journal. Vol. 3. 1965. № 2. Рр. 380.
2. Ignat'ev V. A. Reduktsionnye metody rascheta v statike i dinamike plastinchatykh sistem. Saratov, 1992. 142 s.

© Игнатьев В. А., Ромашкин В. Н., 2014

Поступила в редакцию  
в октябре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Игнатьев В. А., Ромашкин В. Н. Определение редуцированного спектра частот и форм свободных колебаний систем с большим числом степеней свободы на основе сплайн-коллокационной конденсации // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 140—151.

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ**

УДК 625.72

**С. В. Алексиков, М. О. Карпушко**

### **МОДЕЛЬ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕМОНТОМ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ ГОРОДСКИХ ДОРОГ**

Приведена модель оперативного управления дорожно-ремонтными работами, которая позволяет повысить обоснованность организационно-технологических решений по корректировке фактических графиков выполнения дорожно-ремонтных работ с целью завершения строительства в установленные сроки в пределах принятых финансовых ресурсов. Представлен анализ производственной функции, учитывающей работу асфальтобетонного завода (АБЗ), транспортного и укладочного звеньев.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** оперативное управление, мониторинг дорожно-ремонтных работ, детерминированный и вероятностный подходы, регрессионный анализ, производственная функция.

The article provides the operational management model of city roads pavement repair which allows to increase the validity of organizational and technological decisions on updating of the actual schedules of road repair work performance for the purpose of construction completion in established periods within established financial resources. The analysis of the production function considering work of asphalt concrete plant (ABZ), transport and laying links is submitted.

**K e y w o r d:** operational management, monitoring of road repair works, determined and probabilistic approaches, regression analysis, production function.

Сущность оперативного управления состоит в устранении препятствий, возникающих на пути осуществления проектной производственной программы по ремонту дорожного покрытия, в своевременной корректировке технологических процессов в соответствии с меняющимися производственными условиями [1].

В процессе мониторинга выполнения дорожно-ремонтных работ, выполняемого через расчетные интервалы времени  $\Delta t$ , диспетчер оценивает отклонения фактической траектории графика производства работ от проектного (рис.).

В случае существенных отклонений фактического графика принимаются организационно-технологические решения по повышению интенсивности производства работ. Принятие зачастую основывается на производственном опыте, без соответствующего технико-экономического обоснования. До настоящего времени не решен вопрос обоснования допустимых отклонений траектории графика фактического выполнения работ от плановых показателей.





Расчетная схема корректировки графика выполнения дорожных работ в случае его сбоя

Траекторию проектного графика выполнения работ можно описать по следующей формуле:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^N I_i^{\pi} t_i, \quad (1)$$

где  $I_i^{\pi}$  — проектная интенсивность выполнения работ;  $t_i$  — текущее время ( $0 < t_i < T$ ).

Возможность реализации проектного графика работ на объекте в  $i$ -й момент времени за интервал  $\Delta t_i$  определяется условием

$$\begin{cases} I_i^{\phi} \geq I_i^{\pi}; \\ \sum_{i=1}^N \Delta Q_i^{\phi} \geq \sum_{i=1}^N \Delta Q_i^{\pi}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $I_i^{\pi} = \frac{\Delta Q_i^{\pi}}{\Delta t_i}$  и  $I_i^{\phi} = \frac{\Delta Q_i^{\phi}}{\Delta t_i}$  — соответственно проектная и фактическая ин-

тенсивность выполнения дорожно-ремонтных работ в  $i$ -й момент времени, определяется по величине приращения объема работ за интервал времени  $\Delta t_i$ ;  $N$  — количество расчетных интервалов времени в предшествующий период;

$\sum_{i=1}^N \Delta Q_i^{\phi}$ ,  $\sum_{i=1}^N \Delta Q_i^{\pi}$  — соответственно общий фактический и проектный объем выполненных работ в предшествующий период времени.

В случае систематических отклонений фактических объемов работ  $\Delta Q_i^{\Phi}$  в меньшую сторону, нетрудно прогнозировать момент принятия управленческого решения по корректировке строительного процесса:

$$\Delta Q_i^{\Phi} \geq \Delta Q_i^{\Delta}, \quad (3)$$

где  $\Delta Q_i^{\Delta}$  — допустимое отклонение фактического графика выполнения работ от проектного в  $i$ -й момент времени.

Допустимое отклонение от проектного графика определяется резервом в увеличении производительности дорожно-строительного отряда без изменения его состава. При этом допустимое отклонение линейным образом зависит от резерва времени  $(T - t_i)$  до окончания строительства.

При детерминированном подходе допустимое отклонение определяется возможностью увеличения

коэффициента использования  $K_{и}$  ведущих дорожно-строительных машин в составе отряда, определяющих интенсивность производства работ  $I^n$ :

$$\Delta Q_i^{\Delta} = (1 - K_{и}) I^n (T - t_i); \quad (4)$$

производительности механизированного отряда в целом, обеспечивающего проектную интенсивность работ  $I^n$ :

$$\Delta Q_i^{\Delta} = I^n (T - t_i). \quad (5)$$

Вероятностный подход к определению допустимого отклонения основан на нормальности распределения сменного темпа работ, оценивается среднеквадратичным отклонением суточной интенсивности производства работ  $\sigma_I$  относительно математического ожидания  $\bar{I}^n$ :

$$\Delta Q_i^{\Delta p} = \Phi_p \sigma_I (T - t_i). \quad (6)$$

Если в процессе мониторинга строительного процесса отклонения фактического графика выполнения работ превышают допустимые, перед диспетчером возникает задача корректировки технологического процесса. Такая ситуация может возникнуть по причине просчетов проектировщиков, допущенных в проектах организации (ПОС) и производства работ (ППР), несоблюдения проектных решений в процессе строительства или воздействия неучтенных факторов, имеющих, как правило, вероятностный характер (изменение климатических условий производства работ, поломка автомобилей или машин и т. п.) [2].

Несовершенство или несоблюдение проектных решений (ПОС, ППР), обусловленное просчетами при комплектовании дорожно-строительных отрядов, проявляется в устойчивом тренде отклонений. Случайное воздействие производственных факторов приводит к резким изменениям в интенсивности выполнения работ.

Принятие управленческих решений по изменению производственного процесса основано на обеспечении скорректированной интенсивности производства работ  $I_K$

$$I_K = \frac{Q^n - Q_i}{T - t_i}, \quad (7)$$

где  $Q_i$  — объем работ, выполненных до момента ( $t_i$ ) принятия корректирующего решения.

Увеличение интенсивности производства работ возможно за счет повышения производительности АБЗ за счет увеличения количества смесителей, мощности или режима работы;

провозной возможности транспортного звена за счет увеличения грузоподъемности автомобилей, их количества или изменения маршрута перевозки смеси;

интенсивности производства работ на объекте за счет увеличения производительности укладочного звена.

Принятие организационно-технологических решений по корректировке фактической интенсивности производства работ возможно на основе регрессионного анализа данных мониторинга за предшествующий период времени с помощью производственной функции:

$$I_i^\Phi = C_0 \cdot P_{n,i}^{\alpha_1} \cdot W_{t,i}^{\alpha_2} \cdot P_{y,i}^{\alpha_3}, \quad (8)$$

где  $C_0$  — коэффициент, отражающий влияние неучтенных факторов на интенсивность производства работ;  $P_{n,i}$  — производительность АБЗ;  $W_{t,i}$  — провозная возможность транспортного комплекса;  $P_{y,i}$  — производительность укладочного звена;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  — коэффициенты влияния технологических факторов на интенсивность выполнения дорожно-ремонтных работ [3].

Значения коэффициентов  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  определяют стратегию принимаемых решений, а математическая модель (8) позволяет моделировать реакцию производственной среды на корректирующее решение.

Комплексная оценка технологических процессов на интенсивность устройства асфальтобетонного покрытия выполнена авторами на основе имитационного моделирования на ЭВМ более 150 производственных ситуаций. Дальность перевозки смеси изменялась от 5 до 70 км, интенсивности работ — от 68 до 1537 т/смену. Коэффициент использования ( $K_n$ ) асфальтобетонных заводов изменялся от 0,24 до 1,01 ( $\bar{K}_n = 0,71, C_v = 0,25$ ), автотранспорта — от 0,3 до 1,0 ( $\bar{K}_n = 0,93, C_v = 0,09$ ), укладочных звеньев — от 0,08 до 1,0 ( $\bar{K}_n = 0,48, C_v = 0,56$ ).

В условиях достаточности автотранспорта зависимость интенсивности работ ( $I$ ) от производительности АБЗ ( $P_n$ ), транспортного ( $W_t$ ) и укладочного звеньев ( $P_y$ ) имеет вид

$$I = 0,271 P_n^{0,385} W_t^{0,051} P_y^{0,565}, \text{ т/смена.} \quad (9)$$

Коэффициент корреляции — 0,98, стандартная ошибка — 0,107.

Установлено, что сменный объем работ в основном зависит от производительности укладочного звена (коэффициент влияния 0,565). Влияние асфальтобетонных заводов в 1,4 раза меньше (коэффициент влияния 0,385), что объясняется их более высокой производительностью. Автотранспорт практически не влияет на интенсивность работ (0,051).

В условиях дефицита транспорта его влияние увеличивается (коэффициент влияния 0,998) и практически определяет производительность механизированного звена по укладке асфальтобетонной смеси

$$I = 0,906P_{\Pi}^{0,013}W_{\Gamma}^{0,998}P_{\gamma}^{0,016}, \text{ т/смена.} \quad (10)$$

Коэффициент корреляции — 0,98, стандартная ошибка — 0,028.

Предложенная модель оперативного управления дорожно-ремонтными работами позволяет повысить обоснованность организационно-технологических решений по корректировке фактических графиков выполнения работ с целью завершения строительства в установленные сроки в пределах принятых финансовых ресурсов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексиков С. В., Абдулжалилов О. Ю., Карпушко М. О. Укладка горячих асфальтобетонных смесей при ремонте покрытий городских дорог // Вестник Волгogr. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2010. № 17. С. 35—42.
2. Золотарь И. А. Экономико-математические методы в дорожном строительстве. М. : Транспорт, 1974. 248 с.
3. Оценка выпуска асфальтобетонной смеси с позиции математической статистики / С. Ю. Калашников, С. В. Алексиков, М. О. Карпушко, А. В. Куликов // Вестник Волгogr. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2011. № 25. С. 110—114.
1. Aleksikov S. V., Abdulzhalilov O. Yu., Karpushko M. O. Ukladka goryachikh asfal'tobetonnykh smesey pri remonte pokrytiy gorodskikh dorog // Vestnik Volgogr. gos. arkhит.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhит. 2010. № 17. S. 35—42.
2. Zolotar' I. A. Ekonomiko-matematicheskie metody v dorozhnom stroitel'stve. M. : Transport, 1974. 248 s.
3. Otsenka vypuska asfal'tobetonnoy smesi s pozitsii matematicheskoy statistiki / S. Yu. Kalashnikov, S. V. Aleksikov, M. O. Karpushko, A. V. Kulikov // Vestnik Volgogr. gos. arkhит.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhит. 2011. № 25. S. 110—114.

© Алексиков С. В., Карпушко М. О., 2014

Поступила в редакцию  
в декабре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Алексиков С. В., Карпушко М. О. Модель оперативного управления ремонтом дорожных покрытий городских дорог // Вестник Волгogr. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 152—156.

УДК 625.768.5

**С. В. Алексигов, Д. Н. Симончук**

# **РАСЧЕТ УВЛАЖНЕНИЯ ГРУНТОВЫХ РЕЗЕРВОВ ПРИ СООРУЖЕНИИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

Приведена методика расчета увлажнения грунтового резерва при сооружении земляного полотна автомобильных дорог.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** увлажнение, грунт, земляное полотно, автомобильная дорога.

The authors use the method of calculation of moisture of soil reserves at the construction of motorway subgrade.

**К e y w o r d s:** moisture, soil, subgrade, motorway.

В Волгоградской области реализуется федеральная программа строительства сельских дорог для соединения сельских населенных пунктов с сетью автомобильных дорог общего пользования регионального или межмуниципального значения. Возможность реализации программы определяется объемами финансирования дорожного строительства. В условиях дефицита денежных средств следует изыскивать технические решения удешевления строительства дорожных конструкций. Одним из эффективных решений снижения сметной стоимости дорожных одежд является повышение прочности верхней части земляного полотна за счет повышенного уплотнения глинистых грунтов [1]. Исследования В. Ф. Бабкова, А. К. Бируля, В. М. Сиденко, А. М. Каменева, И. Е. Евгеньева [1—3] и других ученых показывают, что уплотнение глинистых грунтов до коэффициента уплотнения 1,0...1,05 возможно при допустимой влажности. В связи с этим при сооружении земляного полотна в засушливых районах Нижнего Поволжья существует проблема повышения естественной влажности грунтов до оптимального значения. В настоящее время нормы увлажнения грунтов при производстве земляных работ носят усредненный характер, не учитывают региональный водно-тепловой режим грунтовых резервов. Возможность дополнительного увлажнения естественной грунтовой толщи в осенне-зимний и весенний периоды года средствами технической мелиорации (снегозадержание, рыхление грунтовой поверхности резерва в осенний период, подкатка участка будущей разработки грунта) игнорируется.

Для обоснованного планирования организационно-технологических мероприятий по сооружению земляного полотна в засушливых районах предлагается методика расчета норм увлажнения грунтовых резервов на основе решения уравнения водно-теплового баланса.

В условиях технической мелиорации водный баланс участка местности в общем виде описывается уравнением [3, 4]:

$$KX + m + W_1 - W_2 + q = Z' + Y', \quad (1)$$

где  $KX$  — сумма атмосферных осадков;  $m$  — количество воды, необходимое для увлажнения грунтового резерва;  $W_1, W_2$  — влагозапасы в расчетном грунтовом слое (толщиной до двух метров) на начало и конец расчетного периода

(декада, месяц);  $q$  — увлажнение расчетного грунтового слоя в резерве от уровня грунтовых вод;  $Z'$ ,  $Y'$  — суммарное испарение и сток с поверхности резерва.

В том случае, когда влагозапасы в грунтовом резерве на начало расчетного периода превышают требуемые (что наблюдается в весенний период просыхания), уравнение (1) имеет вид

$$KX + m + W_1 - W_{\text{тр}} + q = Z' + Y'. \quad (2)$$

В условиях технической мелиорации суммарное испарение определяется так:

$$Z' = Z_{\text{т}} \left[ 1 + \left( \frac{KX + m + W_1 - W_{\text{тр}} + q}{Z_{\text{т}}} \right)^{-n} \right]^{\frac{1}{n}}. \quad (3)$$

Учитывая, что строительные свойства грунтов характеризуются влажностью на границе текучести, выражение в скобках имеет вид

$$\alpha W_{\text{т}}^r = \frac{KX + m + W_1 - W_{\text{тр}} - q}{Z_{\text{т}}}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  — коэффициент перехода от наименьшей влагоемкости грунта к влажности на границе текучести;  $W_{\text{т}}$  — средняя относительная влажность грунта за расчетный период в долях от влажности на границе текучести;  $r$  — показатель, характеризующий водно-физические свойства грунтов ( $r = 1,5 \dots 3,0$ ).

Исследования [3, 4] позволили установить, что коэффициент  $\alpha$  зависит от водно-физических свойств грунтов и изменяется от 0,52 (для песков) до 0,74 (для глин).

Из уравнения (2), учитывая (4), количество воды, необходимое для дополнительного увлажнения грунтового резерва, определяется

$$m = W_{\text{тр}} - W_1 - KX + \alpha W_{\text{т}}^r Z_{\text{т}} + q. \quad (5)$$

В том случае, когда влагозапасы грунта в начале и конце расчетного периода не должны быть меньше требуемых, т. е.  $W_1 = W_2 = W_{\text{тр}}$ , уравнение (5) имеет вид

$$m = \alpha W_{\text{т}}^r Z_{\text{т}} - q - KX. \quad (6)$$

Влагозапасы в грунте на конец расчетного периода, после дополнительного увлажнения инженерными мероприятиями (путем снегозадержания, рыхления поверхности резерва в осенний период, подкатки места будущей разработки грунта), определяются по формуле

$$\alpha W_2 = \frac{\frac{KX + m - q}{W_{\text{нв}}} + \alpha W_1}{1 + \frac{Z_{\text{т}}}{W_{\text{нв}}} \alpha W_1^{r-1}}, \quad (7)$$

Для назначения глубины разработки грунта с допустимой влажностью в резерве необходимо знать глубину промачивания грунтового массива за период весеннее-летнего просыхания. В исследованиях [3] установлено, что изменение наименьшей влагоемкости грунта  $W_{\text{нв}}$  по глубине расчетного слоя  $h_p$  можно представить в виде

$$h_p = \frac{W_{\text{нв}}}{a}, \quad (8)$$

где  $a$  — коэффициент, изменяющийся от 2,0 (для песков) до 4,0 (для глин).

Из уравнения (7), учитывая (8), выражение для расчета глубины промачивания грунта  $h_{\text{пр}}$  до требуемой влажности имеет вид

$$h_{\text{пр}} = \frac{\alpha W_{\text{тр}} \cdot W_1^{r-1} Z_r + KX + m - q}{a\alpha(W_1 - W_{\text{тр}})}. \quad (9)$$

Предложенные зависимости имеют теоретическое обоснование, обеспечены необходимыми для массовых расчетов материалами, все их параметры физически ясны. При расчете по предложенным формулам не может возникнуть каких бы то ни было невязок водно-теплового баланса. Анализ соответствия рассчитанных величин по формулам (7) и (9) показал, что относительная ошибка расчета глубины промачивания грунта  $\pm 21$  см. Из этого следует, что предложенные формулы приемлемы для практического использования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автомобильные дороги (Совершенствование методов проектирования и строительства) / В. М. Сиденко [и др.]. Киев : Будивельник, 1973. 278 с.
2. Сиденков В. М., Батраков О. Т., Покутнев Ю. А. Дорожные одежды с парогидроизоляционными слоями. М. : Транспорт, 1984. 144 с.
3. Алексиков С. В. Сооружение земляного полотна автомобильных дорог из грунтов повышенной влажности с их естественным просушиванием. Омск, 1984. 262 с.
4. Мезенцев В. С. Расчеты водного баланса. Омск, 1976. 75 с.
1. Avtomobil'nye dorogi (Sovershenstvovanie metodov proektirovaniya i stroitel'stva) / V. M. Sidenko [i dr.]. Kiev : Budivel'nik, 1973. 278 s.
2. Sidenkov V. M., Batrakov O. T., Pokutnev Yu. A. Dorozhnye odezhdy s parogidroizolyatsionnymi sloyami. M. : Transport, 1984. 144 s.
3. Aleksikov S. V. Sooruzhenie zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog iz gruntov povyshennoy vlazhnosti s ikh estestvennym prosushivaniem. Omsk, 1984. 262 s.
4. Mezentsev V. S. Raschety vodnogo balansa. Omsk, 1976. 75 s.

© Алексиков С. В., Симончук Д. Н., 2014

Поступила в редакцию  
в декабре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Алексиков С. В., Симончук Д. Н. Расчет увлажнения грунтовых резервов при сооружении земляного полотна автомобильных дорог // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр.-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 157—159.

УДК 625.77-047.36

**В. Н. Анопин, В. Г. Юферев, Г. А. Рулев**

### **ТЕХНОЛОГИЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПОЛОС ОТВОДА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И ПРИДОРОЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС**

Приведены результаты разработки геоинформационных технологий, основанных на применении приемов и методов программно-технических средств обработки и передачи информации при мониторинге состояния полосы отвода автомобильной дороги и прилегающей территории, включая придорожные защитные лесные полосы. Дано описание методики построения цифровой модели ландшафта и электронной ландшафтной карты с картографической и атрибутивной информацией.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** мониторинг, автомобильные дороги, географические информационные системы (ГИС), цифровая модель рельефа (ЦМР), ландшафт.

The authors provide the results of the development of geoinformation technologies based on the use of methods of software and hardware facilities for information processing and transfer of information when monitoring the state of right of way and roadside territories including roadside protective forest strips. The description of the method of the development of digital model of landscape and electronic landscape map with cartographic and attributive information is given.

**К e y w o r d s:** monitoring, roads, GIS, digital model of relief, landscape.

Действующие нормативные документы предусматривают как при строительстве, так и эксплуатации автомобильных дорог обязательное выполнение комплекса мероприятий по охране окружающей среды и обеспечению рационального использования природных ресурсов прилегающей местности. Оценка воздействия автомобильного транспорта на придорожные ландшафты является наиболее достоверной по результатам мониторинга их состояния и в первую очередь снего-, ветро- и шумозащитных лесных полос, представляющих важнейший элемент инженерного обустройства дорог и одновременно инструмент управления экологической ситуацией [1].

В настоящее время наиболее полное, целостное представление о состоянии придорожных ландшафтов и происходящих в них процессах можно получить по их картографическому изображению, созданному с использованием современных географических информационных систем (ГИС). Их применение, включающее всесторонний анализ данных, становится необходимым требованием нашего времени — широкого внедрения и передачи информации.

ГИС — это информационная система, обеспечивающая сбор, хранение, обработку, отображение и распространение пространственных данных исследуемого объекта. Она позволяет в камеральных условиях выполнять практически все функции мониторинга, сокращая время и уменьшая расходы на полевые исследования.

При ландшафтном проектировании автомобильных дорог и ландшафтном планировании последующего землепользования на придорожном пространстве геоинформационные технологии обеспечивают использование приемов и методов применения программно-технических средств обработки и передачи информации, т. е. реализацию имеющихся функциональных возможностей ГИС.



В общем случае в программу ландшафтного планирования входят три этапа:

- 1) инвентаризация природных и социально-экономических условий территории планирования;
- 2) оценка экономических, экологических, социальных и интегральных показателей территории, характеризующая ее положительные и отрицательные для жизнедеятельности человека качества;
- 3) разработка альтернативных схем оптимального использования ресурсов территории, направленных на сохранение ее самовосстановительного потенциала и удовлетворение потребности природопользователей.

Исходя из вышеизложенного, целью наших исследований была разработка технологии ландшафтного планирования адаптивного обустройства придорожных пространств.

В результате выполненной работы была предложена технология геоинформационного ландшафтного моделирования и планирования обустройства придорожных ландшафтов, основанная на синтезе принципов катенарно-бассейнового подхода, методов пластики рельефа и результатов дистанционного мониторинга.

Разработанная технология предполагает использование катенарно-бассейнового подхода и применение разработанных во ВНИАЛМИ методик многопараметрического компьютерного анализа аэрокосмоснимков, ландшафтно-экологического профилирования и ландшафтно-экологического картографирования в лесомелиорации [2].

Применение информационных технологий для обработки картографических и аэрокосмических данных позволяет интегрировать пространственный ландшафтно-экологический анализ, методы математического моделирования и компьютерного картографирования. При проведении дешифрирования аэро- и космоснимков предполагается использование фотограмметрической станции «Талка 3.3», при построении цифровой модели рельефа (ЦМР) — Global Mapper 14.0, OZExplorer, «Талка 3.3», при геоинформационном картографировании — MapInfo 11.0, при полевых работах — приемников спутникового позиционирования GPS.

Технология ландшафтного планирования адаптивного лесозащитного и лесомелиоративного обустройства придорожных земель для лесостепной, степной и полупустынной зон ЕЧ РФ включает систему картографо-геоинформационного обеспечения ландшафтного планирования и проходит три этапа (рис. 1).

На первом этапе — инвентаризационном — проводится сбор всей имеющейся информации об участке дороги: материалов инженерно-геодезических, геологических, гидрологических изысканий, картографических материалов, аэро- и космоснимков, статистических данных и т. д. Осуществляется предварительное дешифрирование аэро- и космоснимков визуальными и автоматизированными методами. Используются аэро- и крупномасштабные космоснимки, обеспечивающие исключение рекогносцировочных обследований территории и возможность расчета в камеральных условиях объемов необходимых полевых работ. Для подробного описания почвенно-растительного покрова каждого структурного элемента проводится ландшафтно-экологическое профилирование на ключевых участках.

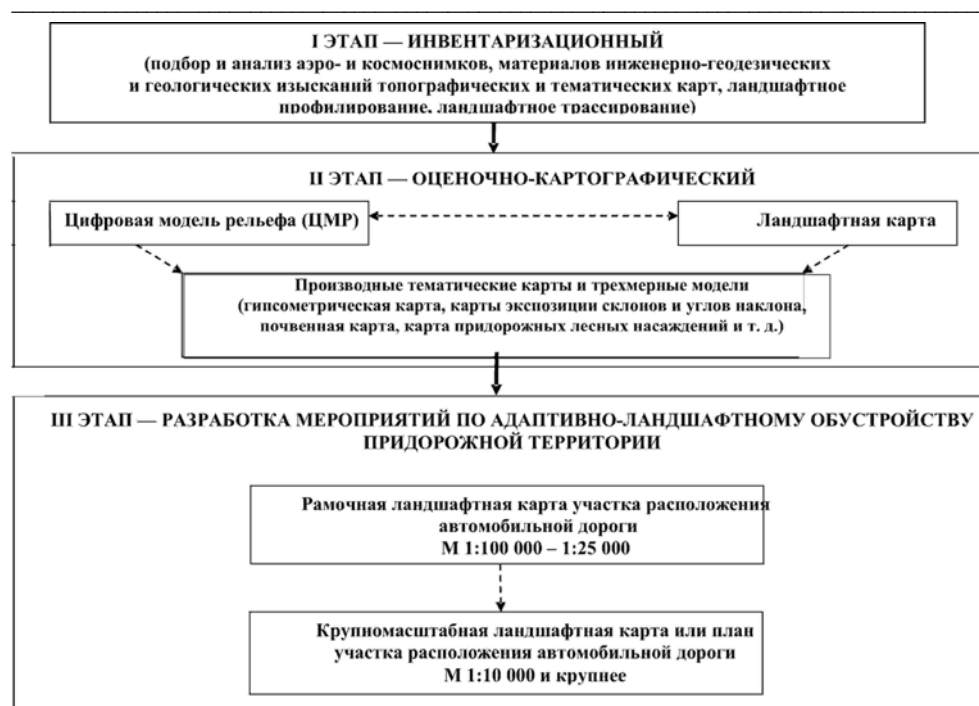


Рис. 1. Структурная модель картографо-геоинформационного обеспечения ландшафтного планирования участка автомобильной дороги

Планирование мероприятий по оптимизации использования земель придорожных ландшафтов предусматривает учет особенностей их пространственной структуры, обуславливающих латеральные связи между морфологическими частями ландшафта. Пространственную структуру ландшафтов целесообразно изучать, применяя ландшафтно-географический подход, основывающийся на двух положениях:

1) ландшафт и его структурные составляющие имеют четкие границы, следствием чего является необходимость учета геоморфологических особенностей ландшафта;

2) обустройство территории должно основываться на катенарной дифференциации ландшафтов, наиболее ярким выражением которой является ярусность рельефа.

Заложение в полосе отвода автомобильной дороги и на прилегающей территории системы ландшафтных профилей позволяет на втором этапе построить модельную сетку с уточненными отметками точек местности в узлах для создания ЦМР. По созданной ЦМР и космоснимкам, которые являются основой моделирования ландшафта в среде ГИС, выявляют принципиальные структуры рельефа.

Используя полученные материалы, составляют ландшафтную и производную оценочную карты. ЦМР строится по данным базы отметок и регулярной ячеисто-узловой модели высот, нанесенной на космокарту. Построение трехмерной цифровой модели рельефа по координатам и отметкам производится в специализированном графическом редакторе, позволяющем преобразовывать цифровые значения в трехмерное изображение (Global Mapper 14.0,

Surfer 11.0 и др.). На рис. 2 представлена визуализация цифровой модели ландшафта, состоящая из цифровой модели рельефа и растровой модели местности.



Рис. 2. Визуализация цифровой модели ландшафта тестового полигона «Безымянка» Михайловского района Волгоградской области

Средством выделения ландшафтов выступает морфодинамический анализ, выполненный на основе операции построения пластики рельефа, заключающийся в установлении по ЦМР границ между выпуклыми и вогнутыми формами рельефа.

На заключительном этапе составления карты пластики рельефа проводятся геокодирование и корректировка границ контуров с использованием основных ландшафтных профилей на ключевых участках трассы. В результате составляют карту типов местоположений территории.

Для общей оценки рельефа выделенного для анализа тестового полигона и визуализации цифровой модели создается трехмерная модель пластики рельефа. Она дает представление о топологии территории, разделяя ее на взаимосвязанные элементы и обеспечивая необходимую наглядность.

После создания модели пластики рельефа выполняются операции морфодинамического анализа, т. е. фиксация, классификация и определение закономерностей взаиморасположения элементарных поверхностей.

Создаваемая на основе ЦМР изолинейная карта (рис. 3) обеспечивает возможность определить положение линий равных высот (горизонталей), необходимых для проектирования и расчета параметров придорожных защитных лесных полос.

Наложение ландшафтной карты на ЦМР позволяет получить цифровую модель ландшафта (ЦМЛ) и другие тематические карты, необходимые для обустройства полос отвода автомобильных дорог и прилегающей местности; долевого участия склонов различной экспозиции, крутизны склонов и направлений линий стока талых и дождевых вод, пригодности почв для произрастания различных древесных пород, эрозионной расчлененности и т. д.

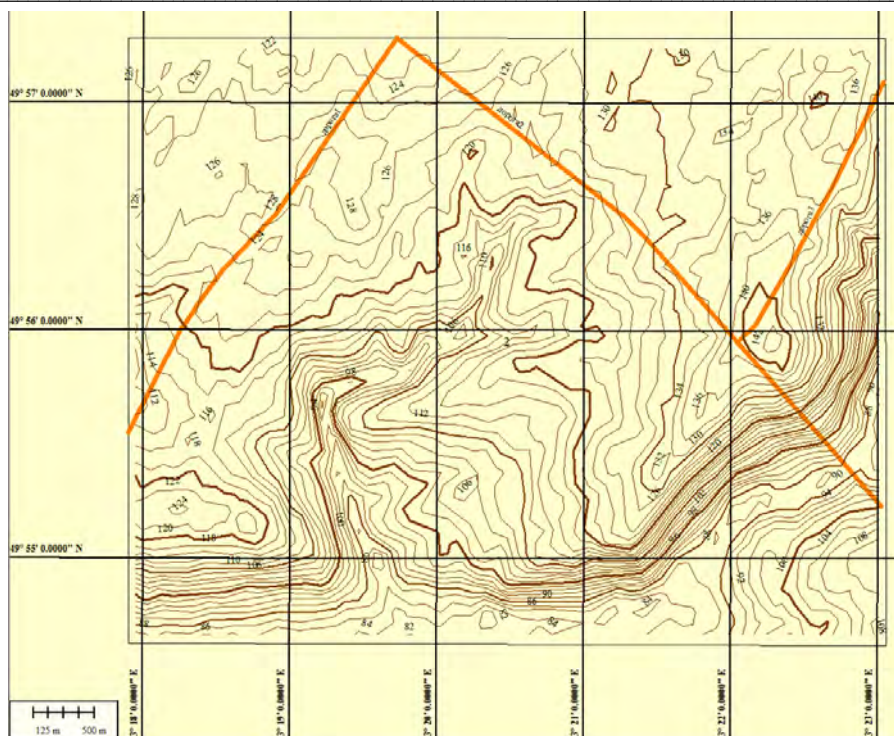


Рис. 3. Изолинейная карта высот тестового полигона «Безымянка» Михайловского района Волгоградской области

В результате комплекса геоинформационных исследований создается геоинформационный слой — электронная ландшафтная карта с тематической картографической и атрибутивной информацией. На рис. 4 показан общий вид ландшафтной карты Волгоградской области с наложенными различными информационными слоями, в том числе главными автомобильными магистралями.

Карты типов элементарных поверхностей рельефа применяют в качестве основы, при необходимости дополняемой географической информацией. В качестве последней используют материалы полевых исследований на ключевых участках, полученные в результате построения ландшафтно-экологических профилей.

В результате поконтурного определения состояния существующих лесонасаждений создаются оценочные карты с использованием геоинформационного программного комплекса MapInfo, которые отражают их территориальное распределение, биометрические показатели придорожных защитных лесных насаждений и позволяют определять очередность необходимых мероприятий.

Разработанная геоинформационная технология мониторинга состояния полосы отвода автомобильной дороги и прилегающей местности, включающих придорожные защитные лесные полосы, обеспечивает получение необходимой информационной и аналитической среды для всесторонней разработки обоснованных мероприятий по рациональному обустройству транспортных магистралей и прилегающей территории.

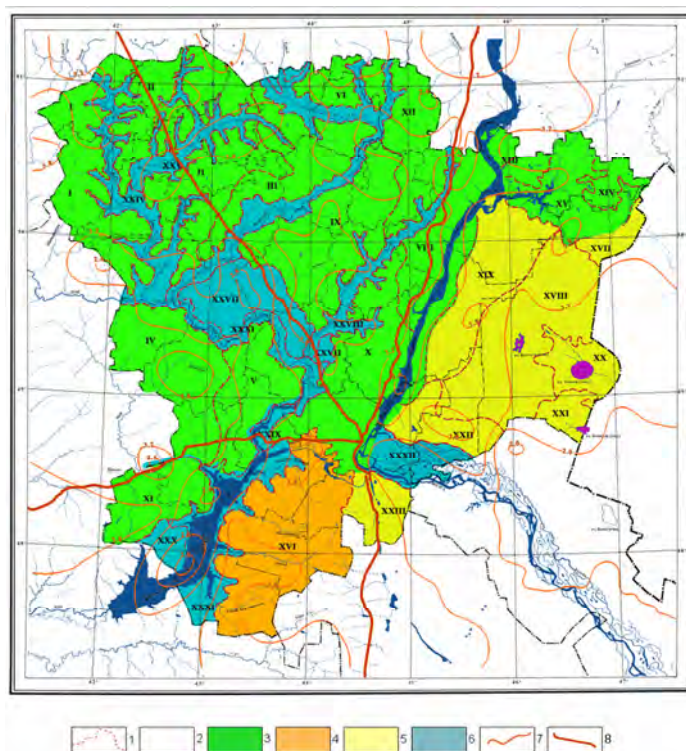


Рис. 4. Ландшафтная карта Волгоградской области: 1 — границы ландшафтных районов; 2 — номера ландшафтных районов; 3 — степные ландшафтные районы (I—XV); 4 — пустынно-степной междуречный район (XVI); 5 — пустынно-степные древнеморские районы (XVII—XXII); 6 — ландшафтные районы речных долин (XXIII—XXXII); 7 — антропогенная нагрузка на ландшафт; 8 — главные автомагистрали

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анопин В. Н., Рулев А. С., Матвеева А. А. Защитные лесные насаждения как инструмент управления экологической ситуацией на железнодорожном транспорте // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр.-во и архит. 2012. Вып. 27(46). С. 183—186.
2. Методические указания по ландшафтно-экологическому профилированию при агролесомелиоративном картографировании / К. Н. Кулик, Е. С. Павловский, А. С. Рулев, В. Г. Юферев и др. М. : Россельхозакадемия, 2007. 42 с.

1. Anopin V. N., Rulev A. S., Matveeva A. A. Zashchitnye lesnye nasazhdeniya kak instrument upravleniya ekologicheskoy situatsiey na zheleznodorozhnom transporte // Vestnik Volgogr. gos. arkhит.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhит. 2012. Vyp. 27(46). S. 183—186.

2. Metodicheskie ukazaniya po landshaftno-ekologicheskomu profilirovaniyu pri agrole-someliiorativnom kartografirovanii / K. N. Kulik, E. S. Pavlovskiy, A. S. Rulev, V. G. Yuferev i dr. M. : Rossel'khozakademiya, 2007. 42 s.

© Анопин В. Н., Юферев В. Г., Рулев Г. А., 2014

Поступила в редакцию  
в декабре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Анопин В. Н., Юферев В. Г., Рулев Г. А. Технология мониторинга состояния полос отвода автомобильных дорог и придорожных территорий с использованием ГИС // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр.-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 160—165

УДК 626.843

**С. И. Евтушенко, М. П. Крахмальная, Т. А. Крахмальный**

# **К ВОПРОСУ ОБ ОСТАТОЧНОМ РЕСУРСЕ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ МОСТОВ ЧЕРЕЗ ВОДОПРОВОДЯЩИЕ КАНАЛЫ**

Приводятся сведения о нынешнем состоянии мостового хозяйства на территории Ростовской области, история вопроса оценки остаточного ресурса мостовых сооружений, а также полученные авторами по результатам расчета значения коэффициентов значимости строительных конструкций мостового сооружения.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** остаточный ресурс, строительные конструкции, мостовое сооружение, надежность, поврежденность.

The article provides data on a current state of bridges on the territory of Rostov Oblast, the historical background for the assessment of residual operation life of bridge constructions, as well as received by the authors results of calculation of value of coefficients of the importance of construction designs of a bridge.

**K e y w o r d s:** residual operational life, construction designs, bridge construction, reliability, damage.

В структуре автомобильной отрасли мосты и мостовые сооружения в муниципальных образованиях занимают ведущее положение, будучи не только наиболее сложными и ответственными сооружениями, но и узлами транспортной сети, во многом определяющими эффективность функционирования транспорта в целом. Поддержание их в исправном состоянии является одним из основных условий обеспечения нормальной, безаварийной эксплуатации водопроводящих каналов и автомобильных дорог федерального и регионального назначения.

На сегодняшний день проблема улучшения состояния мостовых сооружений стоит особенно остро. Постановлением Правительства Ростовской области от 08.08.2012 № 751 утверждена областная долгосрочная целевая программа «Развитие сети автомобильных дорог общего пользования в Ростовской области на 2015—2020 годы», из содержания которой следует, что по состоянию на 1 января 2012 года 39 % мостовых сооружений на сети автомобильных дорог регионального и межмуниципального значения находятся в неудовлетворительном состоянии, в том числе на 58 сооружениях (14 %) состояние не может быть доведено до нормативных требований путем проведения капитального ремонта (ремонтонепригодные мосты) и требуется их реконструкция или строительство новых мостов.

Для эффективного управления техническим состоянием мостовых сооружений научный и практический интерес представляет не только знание фактического состояния сооружения на момент обследования, но и его изменение на перспективу, т. е. прогноз его остаточного ресурса. В настоящее время определение достоверного значения остаточного ресурса широко востребовано не только в строительной области и гидротехнической деятельности, но и во многих других отраслях промышленного производства и металлургии. Согласно действующим нормам Ростехнадзора, определение промежутка времени до наступления предельного (неработоспособного) состояния объекта (остаточного ресурса) является обязательным при экспертизе промышленной безопасности всех типов объектов.



Еще в середине XX века не было понятия «остаточный ресурс». Ученые мира разрабатывали расчеты надежности и безопасности зданий и сооружений. И в настоящее время расчет величины остаточного ресурса напрямую связан с определением различных показателей надежности, таких как долговечность, безотказность, риск достижения предельного состояния и пр.

В 1924 г. Н. Н. Стрелецким были выделены три фактора, определяющих безопасную работу сооружения: изменчивость свойств в материалах, изменчивость нагрузки, конструктивная поправка на правильность и качество изготовления конструкций. Им был предложен универсальный подход по нахождению оптимального срока службы, определяемого по минимуму эксплуатационных расходов.

Огромный вклад в развитие основ надежности внесли В. В. Болотин, А. И. Ржаницын и др. В. В. Болотиным была применена теория случайных процессов к решениям задач надежности с учетом фактора времени и сформулированы основные положения современной теории расчета. Основным в ней являлось предположение о поведении объекта как результата его взаимодействия с окружающей средой. Дальнейшее развитие предложенного подхода произошло в работах Е. Везикари, А. Сарья, С. А. Тамашева, Ю. Д. Сухова, Н. Н. Складнева и др.

В области мостостроения и строительства автомобильных дорог в середине 90-х годов XX века поднимался вопрос о надежности и остаточном ресурсе мостовых сооружений. Большой вклад в развитие теории надежности и остаточного ресурса мостовых сооружений внесли В. И. Шестериков и А. И. Васильев.

Впервые обобщение всех расчетов по надежности для создания методики по определению остаточного ресурса для зданий и сооружений было выполнено в 1989 г. А. Н. Добромисловым [1, 2]. Его работы послужили основой для большинства современных методик расчета.

Методика А. Н. Добромислова основана на вычислении относительной надежности сооружения, зависящей от нормативного и фактического коэффициентов надежности конструкции.

$$J = \gamma / \gamma_0,$$

где  $\gamma$  — фактический коэффициент надежности конструкции с учетом имеющихся повреждений.

Используя величину относительной надежности конструкции, определяется ее поврежденность:

$$\xi = 1 - J.$$

Зная поврежденность каждой отдельной конструкции, можно определить общую оценку поврежденности сооружения с использованием коэффициентов значимости.

$$\xi = \frac{\alpha_1 \xi_1 + \alpha_2 \xi_2 + \dots + \alpha_i \xi_i}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_i},$$

где  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_i$  — средняя величина повреждений отдельных видов конструкций;  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i$  — коэффициенты значимости отдельных видов конструкций для мостового сооружения.

После чего определяется работоспособность строительного сооружения и его остаточный ресурс.

Полученные А. Н. Добромысловым зависимости позволяют количественно оценивать эксплуатационную пригодность конструкций сооружений во времени, устанавливать время проведения ремонтов, а также прогнозировать возможность наступления аварии при отсутствии ремонта, что способствует повышению надежности.

Однако при этом расчете остается непонятным назначение коэффициентов значимости  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i$ . В работе «Рекомендации по оценке надежности строительных конструкций по внешним признакам» (М., 1989) (руководителем является А. Н. Добромыслов), приводится следующее: «Коэффициенты значимости конструкций устанавливаются на основе экспертных оценок, учитывающих социально-экономические последствия разрушения отдельных видов конструкций, влияния возможного разрушения рассматриваемой конструкции на обрушение других конструкций, характера разрушения (разрушение с предварительным оповещением посредством развития пластических деформаций или мгновенное хрупкое разрушение)». Для этого необходимо проанализировать выявленные повреждения конструкций сооружения на возможность разрушения конструкции, а также на возможность при разрушении одной конструкции разрушения всего сооружения в целом, образуя тем самым прогрессирующее разрушение. В примере, приведенном в той же работе, каждой конструкции присвоен коэффициент значимости «1», если разрушение конструкции ведет к обрушению еще трех элементов сооружения, то коэффициент значимости присваивается «3», если обрушение конструкции ведет к обрушению шести вышележащих конструкций, то коэффициент значимости равен «6», и т. д.

Четкие указания по определению величин коэффициента значимости в научной и инженерной литературе по-прежнему отсутствуют. На практике эксперты принимают их значения произвольно, на основе своего опыта, знаний и субъективной оценки.

Таким образом, любое назначение коэффициентов значимости конструкций является процессом субъективным, зависящим от степени компетенции эксперта, и не имеет научного обоснования. Кроме того, такой подход не отражает влияния места несущей конструкции в объекте в целом, как и степени возможного ущерба, вызванного именно ее обрушением.

Авторами произведен расчет коэффициентов значимости строительных конструкций мостового сооружения, основанный на определении значимости конструкций как элемента объекта в целом, их места нахождения по объему, площади и степени влияния в конструктивной схеме объекта, степени возможного ущерба, вызванного именно их обрушением.

Предлагаемый подход к определению коэффициента значимости строительной конструкции как отношение объема или площади возможного обрушения здания или сооружения из-за ее аварии к общему объему или площади конструкции можно по аналогии подвести под определение геометрической вероятности события.

Так, авторы рассчитали объем железобетонных конструкций для типового моста через каналы с тремя пролетами — 9,0, 12 и 9,0 м соответственно.



Выполненные расчеты для определения коэффициентов значимости сведены в табл. 1. При этом следует учитывать, что при разрушении опоры обрушится все мостовое сооружение; при разрушении мостовых балок обрушатся конструкции, расположенные выше; при разрушении асфальтобетонного покрытия также будут повреждены конструкции железобетонных плит дорожного покрытия. Разрушение асфальтобетонного покрытия тротуара влечет за собой разрушение конструкций железобетонных плит и одной мостовой балки, поэтому коэффициент значимости определялся приблизительно из отношения объема одной мостовой балки к объему сооружения. Самые независимые конструкции, наличие или отсутствие которых практически не влияет на несущую способность моста, — конструкции ограждения. Однако эти конструкции влияют на функциональность всего сооружения, возможность безопасного перехода пешеходов.

Т а б л и ц а 1

*Определение коэффициентов значимости для конструкций железобетонного моста*

| Конструкция                        | Объем конструкции | $\frac{V_{\text{конструкции}}}{V_{\text{моста}}}$ | Коэффициент значимости |
|------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------|------------------------|
| Свайные опоры                      | 6,8               | 0,06                                              | 1,0                    |
| Ребристые мостовые балки           | 73,2              | 0,62                                              | 0,94                   |
| Плиты дорожного покрытия           | 22,5              | 0,19                                              | 0,32                   |
| Асфальтобетонное дорожное покрытие | 9,0               | 0,08                                              | 0,32                   |
| Тротуар                            | 2,3               | 0,02                                              | 0,15                   |
| Ограждение                         | 3,6               | 0,03                                              | 0,03                   |
| <i>Итого</i>                       | 117,4             | 1,0                                               | —                      |

Полученные коэффициенты значимости меньше единицы, однако более точно отражают специфику разрушения мостовых сооружений. Неучтенным при таком расчете остается только подмостовное русло и боковые стены канала, но так как разрушение берегов и русла канала также может привести к разрушению всего мостового сооружения, то целесообразно коэффициент значимости для русла принять равным 1,0.

Аналогичные расчеты объемов конструкций были проведены авторами для мостов с балками коробчатого сечения, мостов с каменными устоями и с железобетонными лотками. Посредством чего были получены значения коэффициентов значимости для всех видов конструкций типовых мостов на каналах Ростовской области.

Результаты выполненных расчетов приведены в табл. 2. При выполнении расчета остаточного ресурса мостов на мелиоративных каналах целесообразно определять коэффициенты значимости на основании расчета или по табл. 2.

На основании проведенного обследования мостового сооружения и выявленных при этом дефектов и повреждений каждой конструкции присваивается категория технического состояния.

Очевидно, что в Ростовской области множество мостов находится в аварийном или неработоспособном состоянии, и все мосты через водопроводящие каналы нуждаются в текущем или капитальном ремонте. Выполняемый расчет остаточного срока службы для каждого мостового сооружения позволяет оценить техническое состояние сооружения и ориентироваться в распределении финансирования на капитальные и текущие ремонты.

Такие расчеты остаточных сроков службы мостовых сооружений позволяют в рамках областной долгосрочной целевой программы «Развитие сети автомобильных дорог общего пользования в Ростовской области на 2015—2020 годы», правильно организовать очередность восстановления мостов через водопроводящие каналы.

Т а б л и ц а 2

*Коэффициенты значимости отдельных видов железобетонных  
и каменных конструкций мостового сооружения*

| Название конструкции                                                              | Коэффициент значимости $\alpha$ |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Подмостовное русло                                                                | 1,0                             |
| Свайные опоры моста                                                               | 1,0                             |
| Конструкции железобетонных лотков                                                 | 1,0                             |
| Каменные или кирпичные опоры моста                                                | 1,0                             |
| Береговые железобетонные укрепления перед мостами с лотком                        | 1,0                             |
| Железобетонные ребристые мостовые балки                                           | 0,88...0,94                     |
| Железобетонные коробчатые мостовые балки                                          | 0,8...0,86                      |
| Сборные железобетонные плиты, уложенные на опоры или на укрепленные берега канала | 0,78...0,84                     |
| Сборные плиты покрытия моста                                                      | 0,32...0,38                     |
| Асфальтобетонное покрытие                                                         | 0,32...0,38                     |
| Грунтовое покрытие моста                                                          | 0,3...0,4                       |
| Конструкции и покрытие тротуара                                                   | 0,1...0,15                      |
| Конструкции ограждения                                                            | 0,03...0,05                     |

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Добромыслов А. Н.* Оценка эксплуатационной надежности строительных конструкций по внешним признакам // Проектирование и расчет строительных конструкций : сб. статей / ЛДНП. СПб, 1989. С. 76—85.

2. *Добромыслов А. Н.* Диагностика повреждений зданий и инженерных сооружений : Справочное пособие. М. : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. 256 с.

1. *Dobromyslov A. N.* Otsenka ekspluatatsionnoy nadezhnosti stroitel'nykh konstruktсий po vneshnim priznakam // Proektirovanie i raschet stroitel'nykh konstruktсий : sb. statey / LDNP. SPb, 1989. S. 76—85.

2. *Dobromyslov A. N.* Diagnostika povrezhdeniy zdaniy i inzhenernykh sooruzheniy : Spravochnoe posobie. M. : Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2006. 256 s.

© *Евтушенко С. И., Крахмальная М. П., Крахмальный Т. А., 2014*

*Поступила в редакцию  
в ноябре 2013 г.*

*Ссылка для цитирования:*

*Евтушенко С. И., Крахмальная М. П., Крахмальный Т. А.* К вопросу об остаточном ресурсе длительно эксплуатируемых мостов через водопроводящие каналы // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 166—170.

УДК 539. 218:625.855.3:625.76

**А. А. Ермилов, С. В. Алексиков**

## **ОДНОРОДНОСТЬ ВИБРОУПЛОТНЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ РЕМОНТЕ ГОРОДСКИХ ДОРОГ**

Дана оценка однородности виброуплотнения асфальтобетонного покрытия в процессе ремонта городских дорог.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** плотность асфальтобетона, однородность уплотнения покрытия, коэффициент вариации плотности асфальтобетона.

The assessment of homogeneity of vibrocompaction of asphalt concrete coverings when repairing city roads is given.

**К е y w o r d s:** asphalt concrete density, homogeneity of compaction of a covering, coefficient of variation of asphalt concrete density.

В настоящее время, чтобы повысить качество ремонта городских дорог, внедряют новые дорогостоящие технологии с использованием геосеток, георешеток, смеси ЩМА, добавок серы в дорожный материал, ресайклирование старого асфальтобетона. Вместе с тем проблема повышения долговечности асфальтобетонных покрытий может быть частично решена за счет повышения качества дорожно-ремонтных работ. Исследования показывают, что одной из основных причин преждевременного разрушения дорожного покрытия городских дорог после их ремонта является недостаточное уплотнение асфальтобетонной смеси [1]. Именно на стадии укатки дорожного покрытия происходит формирование структуры асфальтобетона, что напрямую влияет на долговечность дороги. Уплотнение дорожного покрытия без учета специфики городских условий не позволяет достичь требуемого коэффициента уплотнения смеси [2]. В результате на проезжей части преждевременно формируются различные дефекты: выбоины, колеи, поперечные трещины старого покрытия, которые в процессе эксплуатации «копируются» на отремонтированную поверхность (рис. 1).



Рис. 1. Копирование старой трещины (фото слева) на дорожном покрытии через год эксплуатации городской дороги (фото справа)

Специфика городских условий ремонта дорог наиболее явно проявляется в значительных интенсивных разрушениях дорожного покрытия; необходимости ремонта дорог малыми и средними «картами»; открытии интенсивного движения автотранспорта по участку дороги сразу после его ремонта; наличии труднодоступных для уплотнения участков покрытия (смотровые люки, бордюры, карманы и т. п.); ремонте достаточно узких внутриквартальных дорог, проездов и дворов; дефиците малогабаритной дорожной техники и т. д.

Так, например, при устройстве покрытия внутриквартальных дорог и проездов из-за больших габаритов асфальтоукладчик не везде способен уложить смесь, особенно на примыканиях и перекрестках. Смесь, как правило, укладывают вручную лопатами, без предварительного уплотнения виброплитой асфальтоукладчика, что снижает прочностные характеристики дорожного покрытия.

Качество уплотнения асфальтобетонного покрытия оценивается коэффициентом уплотнения и коэффициентом его вариации [3—7]. В целях совершенствования технологии дорожно-ремонтных работ в июле 2013 г. проведены полевые исследования однородности виброуплотнения асфальтобетонных покрытий. Укладка горячей мелкозернистой асфальтобетонной смеси марки 1, толщиной 0,05 м выполнялась асфальтоукладчиком Vogele Super 1803-1 (Wirtgen group). Уплотнение смеси выполнял легкий статический каток «Раскат ДУ-47» (7,5 т) за четыре прохода по следу, затем тяжелый комбинированный каток «Раскат ДУ-84» (14 т) за шесть проходов по следу в статическом режиме работы и четыре прохода — в динамическом. Измерения плотности смеси выполнялись плотномером ПАБ после прохода асфальтоукладчика, каждого второго прохода дорожных катков в статическом режиме работы и каждого прохода комбинированного катка в динамическом режиме работы. В результате статистической обработки более 250 измерений установлена закономерность изменения коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси, который по окончании процесса укатки достиг 1,03...1,05 (рис. 2).

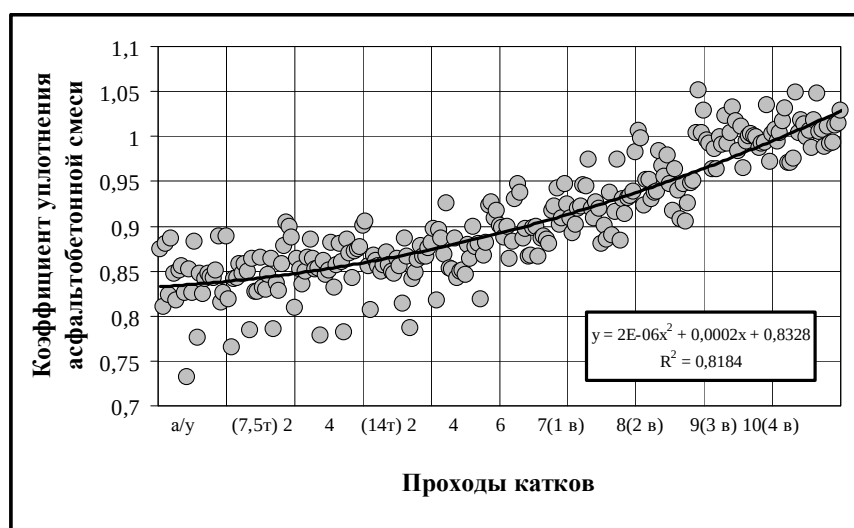


Рис. 2. Изменение коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси в процессе укатки дорожного покрытия

Оценка однородности уплотнения смеси показала (рис. 3), что принятая технология укатки покрытия эффективна, позволяет снизить коэффициент вариации уплотнения ( $C_v$ ) с 0,04 до 0,15, что соответствует оценке «отлично» [7]. Кроме этого, виброуплотнение смеси на завершающем этапе позволяет сократить число катков без снижения качества уплотнения, уменьшить себестоимость дорожно-ремонтных работ и сроки их выполнения, снизить издержки на городском транспорте в период ремонта улично-дорожной сети, открыть движение городского автотранспорта на участке УДС сразу после ремонта без последствий для отремонтированного покрытия.

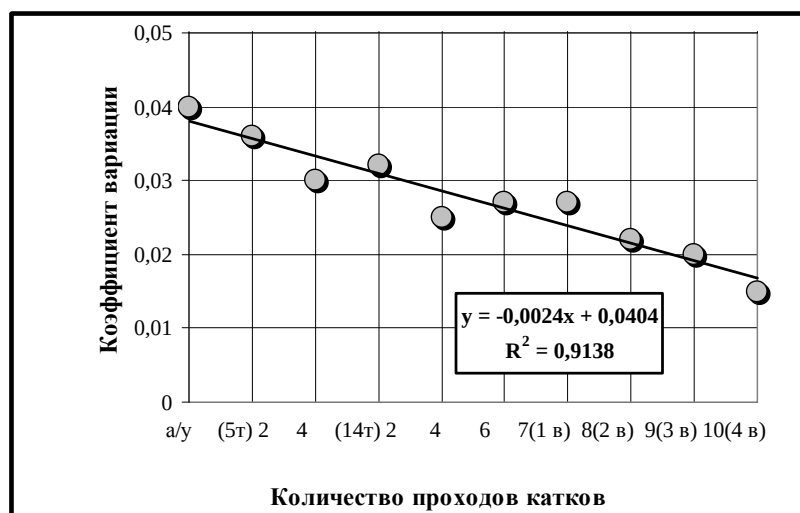


Рис. 3. Изменение коэффициента вариации плотности смеси в процессе ее уплотнения

Анализ гистограмм (рис. 4—8) позволил сделать заключение о нормальности распределения коэффициента уплотнения на всех этапах уплотнения смеси.

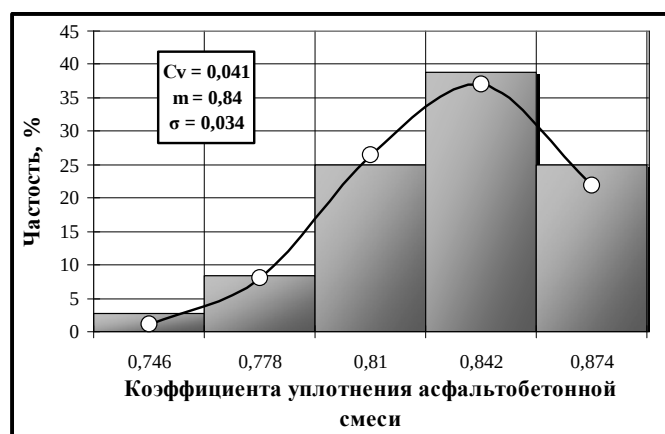


Рис. 4. Гистограмма распределения коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси после укладки асфальтоукладчиком Vogele Super 1803-1 (Wirtgen group)

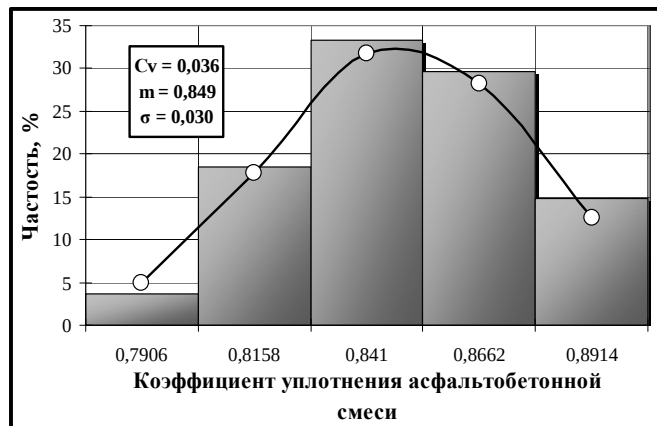


Рис. 5. Гистограмма распределения коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси после двух проходов катка «Раскат ДУ-47» (7,5 т)

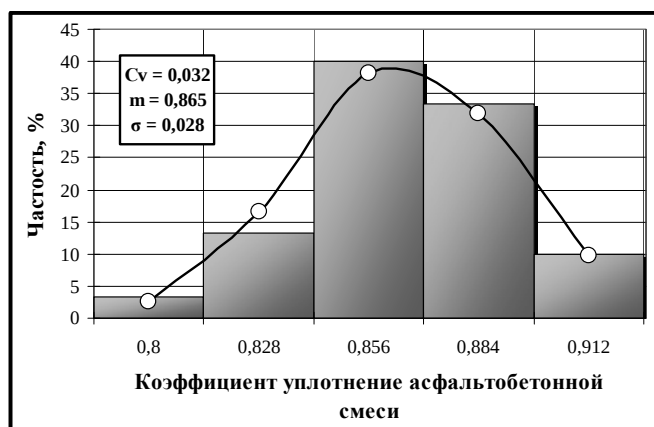


Рис. 6. Гистограмма распределения коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси после двух проходов катка «Раскат ДУ-84» (14 т)

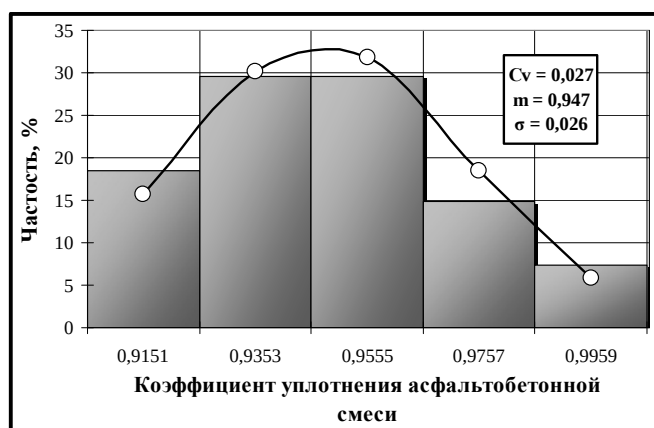


Рис. 7. Гистограмма распределения коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси после семи проходов катка «Раскат ДУ-84» (14 т) (один проход в динамическом режиме)

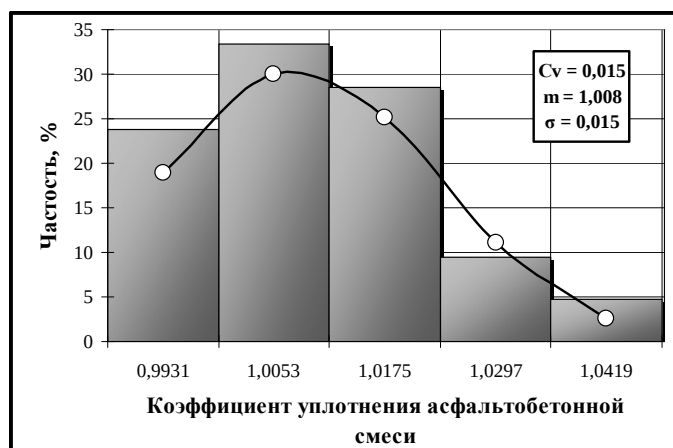


Рис. 8. Гистограмма распределения коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси после десяти проходов катка «Раскат ДУ-84» (14 т) (четыре прохода в динамическом режиме)

После распределения смеси асфальтоукладчиком Vögele Super 1803-1 (Wirtgen group) математическое ожидание коэффициента уплотнения равно 0,84 (см. рис. 4). Укатка смеси статической нагрузкой (катки «Раскат ДУ-47», «Раскат ДУ-84») позволила повысить коэффициент уплотнения до 0,86 (см. рис. 6). При этом правосторонняя асимметрия гистограммы после укладки смеси асфальтоукладчиком (см. рис. 4) трансформируется в симметричную (см. рис. 5, 6). В дальнейшем, в ходе уплотнения смеси вибрационной нагрузкой гистограмма постепенно приобретает левостороннюю асимметрию (см. рис. 7, 8). Математическое ожидание коэффициента уплотнения достигает 1,03. Около 25 % покрытия имеет коэффициент уплотнения 0,99; 71 % покрытия — 1,00...1,03; 5 % покрытия — 1,04 (см. рис. 8). Следует отметить, что повышенное уплотнение покрытия позволяет снизить вероятность образования колеи на проезжей части после открытия отремонтированного участка дороги для движения автотранспорта.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Проблему повышения долговечности городских дорог можно малозатратно решить за счет повышенного уплотнения асфальтобетонных покрытий.
2. Применение технологии комбинированного уплотнения смеси с использованием виброуплотнения на завершающем этапе укатки покрытия позволяет обеспечить отличное качество работ. Коэффициент уплотнения покрытия достигает значений 1,03...1,05 при коэффициенте вариации 0,15.
3. Повышенное уплотнение покрытия в сжатые сроки позволяет сократить число катков без снижения качества уплотнения, снизить себестоимость дорожно-ремонтных работ, сократить фронт и повысить интенсивность выполнения дорожно-ремонтных работ, снизить транспортные издержки на ремонтируемом участке УДС, уменьшить вероятность образования колеи на покрытии после открытия по нему движения автотранспорта.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексиков С. В., Ермилов А. А. Исследование причин преждевременного разрушения асфальтобетонных покрытий городских дорог // Дороги и мосты. М. : [ФГУП РОСДОРНИИ], 2013. Вып. 29/1. С. 113—124.

2. Ермилов А. А. Вероятностная оценка уплотняемости асфальтобетона при ремонте городских дорог // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 30(49). С. 313—319.

3. Вентцель Е. С. Теория вероятностей : учебник. 11-е изд., стер. М. : КНОРУС, 2010. 664 с.

4. Рокас С. Ю. Статистический контроль качества в дорожном строительстве. М. : Изд-во «Транспорт», 1977. 152 с.

5. Рокас С. Ю. Статистические методы обработки результатов испытаний : учеб. пособие. Вильнюс, 1977. 92 с.

6. Рокас С. Ю. Методические рекомендации по оценке однородности дорожного асфальтобетона. Вильнюс, 1980. 38 с.

7. Семенов В. А. Качество и однородность автомобильных дорог. М. : Транспорт, 1989. 125 с.

1. Aleksikov S. V., Ermilov A. A. Issledovanie prichin prezhdvremennogo razrusheniya asfal'tobetonnykh pokrytiy gorodskikh dorog // Dorogi i mosty. M. : [FGUP ROSDORNI], 2013. Вып. 29/1. С. 113—124.

2. Ermilov A. A. Veroyatnostnaya otsenka uplotnyaemosti asfal'tobetona pri remonte gorodskikh dorog // Vestnik Volgogr. gos. arkhит.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhит. 2013. Вып. 30(49). С. 313—319.

3. Venttsel' E. S. Teoriya veroyatnostey : uchebник. 11-e izd., ster. M. : KNORUS, 2010. 664 s.

4. Rokas S. Yu. Statisticheskiy kontrol' kachestva v dorozhnom stroitel'stve. M. : Izd-vo «Transport», 1977. 152 s.

5. Rokas S. Yu. Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov ispytaniy : ucheb. posobie. Vil'nyus, 1977. 92 s.

6. Rokas S. Yu. Metodicheskie rekomendatsii po otsenke odnorodnosti dorozhnogo asfal'tobetona. Vil'nyus, 1980. 38 s.

7. Semenov V. A. Kachestvo i odnorodnost' avtomobil'nykh dorog. M. : Transport, 1989. 125 s.

© Ермилов А. А., Алексигов С. В., 2014

Поступила в редакцию  
в ноябре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Ермилов А. А., Алексигов С. В. Однородность виброуплотнения асфальтобетонных покрытий при ремонте городских дорог // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 171—176.



**ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ,  
КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА,  
ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ**

УДК 697.932.3

**Д. В. Прилепский**

**КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КАМЕРЫ ОРОШЕНИЯ  
С ПОПЕРЕЧНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ФОРСУНОК**

Описана форсуночная камера орошения новой конструкции с поперечным расположением форсунок, а также даны результаты физической причины неравномерного распределения воды в факеле распыла центробежной форсунки, используемой в форсуночных камерах систем кондиционирования воздуха.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** вентиляция, кондиционирование воздуха, форсуночная камера, центробежная форсунка.

The author describes a nozzle chamber with crossed configuration of nozzles. The article provides the results of physical cause of uneven distribution of water in a spray cone of centrifugal nozzle used in nozzle chambers of air conditioning systems.

**Key words:** ventilation, air conditioning, nozzle chamber, centrifugal nozzle.

Сегодня огромное количество систем кондиционирования воздуха общественных и промышленных объектов России оборудовано камерами орошения, причем большинство из них вышли из строя и требуют замены. Потребитель готов поменять существующие камеры на аналогичные новые, сохранив сами кондиционеры, так как полная замена оборудования требует серьезных материальных затрат и часто связана с технологическими сложностями. Поэтому исследования, направленные на улучшение энергетических и эксплуатационных характеристик форсуночных камер, остаются актуальными и в настоящее время.

Типовые форсуночные камеры в отечественных и зарубежных кондиционерах имеют ряд недостатков:

большие габариты (ограничение скорости воздуха до 3 м/с);

невысокие значения объемных коэффициентов тепло- и массопереноса (причиной является неравномерное и неэффективное распределение капель в дождевом объеме камеры);

низкие эксплуатационные показатели (быстрая засоряемость форсунок и трудоемкость их чистки).

Эффективность процессов тепло- и массопереноса в камерах орошения в значительной мере зависит от распределения распыленной жидкости в дождевом объеме камеры, так как именно совокупность взвешенных капель создает поверхность переноса, а размер, скорость и направление движения капель определяют значения локальных коэффициентов переноса.

Распределение капель в объеме камеры орошения определяется формой, плотностью и равномерностью факела распыла единичной форсунки, а также схемой расположения форсунок внутри камеры.

Давно известно, что плотность распределения жидкости как в радиальном, так и в окружном направлениях факела распыла центробежной форсунки неравномерна [1, 2], но причины этого явления четко не сформулированы. Так, в работе [1] указано, что «основными причинами неравномерного распределения жидкости вокруг оси факела являются различные асимметрии распылителя, связанные с его конструкцией (конечное число входных каналов), или качеством его изготовления (эксцентриситет сопла по отношению камеры закручивания, различие в размерах входных каналов, наличие рисок и заусенцев)». Как видно, указанные причины не раскрывают физической сути явления.

Так, в работе [3] описана методика и представлены результаты исследования, которые позволили получить объективную и наглядную информацию о плотности распределения воды в факелах распыла центробежных форсунок с одним тангенциальным каналом. Анализ данных указал на значительную неравномерность расхода как в радиальном, так и в окружном направлениях.

Для выяснения причины неравномерного распределения воды, а также для уточнения физической картины течения жидкости в центробежных форсунках проводились исследования воздушного вихря и толщины пленки жидкости в камере закручивания и на срезе сопла форсунки [3].

Полученные результаты позволили установить реальную физическую причину неравномерного распределения жидкости в факеле распыла центробежных форсунок, которая состоит в том, что пленка жидкости на срезе сопла имеет разную толщину из-за несоосности воздушного вихря и сопла. Указанное смещение вызвано тем, что воздушный вихрь ведет себя как упругое тело, он прогибается внутри камеры закручивания под действием потока жидкости, поступающего в форсунку через тангенциальный канал, и при этом торец вихря на срезе сопла смещается относительно оси сопла.

Результаты исследований имеют важное значение для теории центробежных форсунок, так как многие специалисты связывают с толщиной пленки дисперсность распыла и, кроме того, подтверждают целесообразность применения в камерах орошения форсунок двустороннего распыления, которые, как показал опыт эксплуатации, реже засоряются и обеспечивают более тонкое распыливание воды, что повышает энергетическую эффективность камер орошения [4].

Однако для того, чтобы применять форсунки двустороннего распыления в камере орошения и избежать неэффективного направления факелов распыла от форсунок по ходу воздуха в сторону выходного сепаратора, потребовалось решить вопрос об их оптимальной компоновке в дождевом объеме камер.

В исследованиях В. Д. Коркина [5] было предложено установить форсунки поперек воздушного потока так, чтобы они распыляли воду снизу вверх. К сожалению, это предложение не получило практического внедрения.

Поперечная компоновка форсунок в дождевом объеме камеры орошения особенно актуальна для форсунок двустороннего распыления, так как они создают два факела, направленных в противоположные стороны.

Было также предложено на пути факелов распыла установить короткие каплеотбойные цилиндры и направить отраженные от внутренней поверхности цилиндров факелы горизонтально, поперек потока воздуха.

Принципиальная схема устройства форсуночной камеры представлена на рис. 1. Форсуночная камера орошения имеет корпус 1, поддон 2 с установленным в нем пластинчатым сепаратором 3, горизонтальный коллектор 4 со стояком 5. На стояке установлены форсунки двустороннего распыления 6. Факелы распыла направлены поперек потока воздуха и на пути каждого факела установлены каплеотбойные цилиндры 7. Цилиндры расположены вертикальными рядами вплотную друг к другу и собраны в кассеты, которые крепятся к корпусу камеры. В поддоне установлен поплавковый клапан 8, который регулирует верхний и нижний уровни воды.

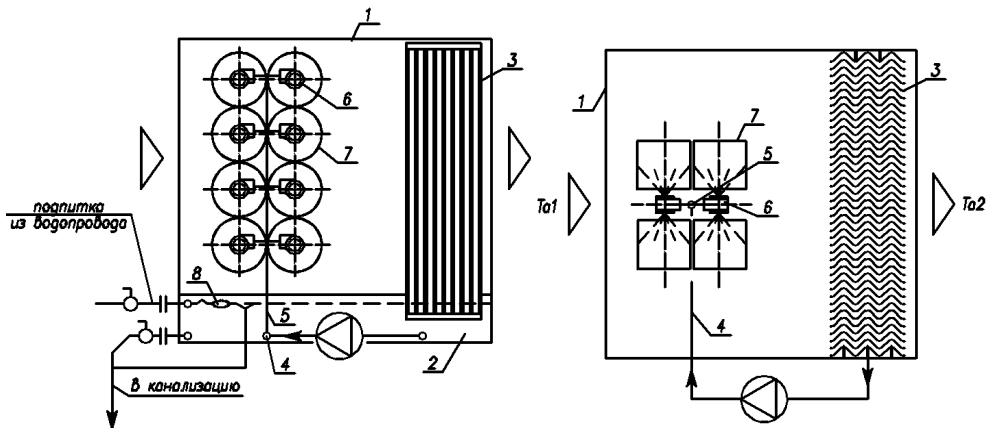


Рис. 1. Принципиальная схема устройства форсуночной камеры

Форсуночная камера работает следующим образом. Обрабатываемый воздух поступает через входной патрубок в корпус камеры 1 и контактирует с водой, распыляемой двусторонними форсунками 6. Мелкодисперсные факелы распыла, отраженные от внутренних поверхностей каплеотбойных цилиндров 7, полностью и равномерно перекрывают все живое сечение камеры для прохода обрабатываемого воздуха. Вода, попадая в поддон 2, забирается циркуляционным насосом и вновь подается к форсункам.

Новая конструкция форсуночной камеры позволяет устранить практически все указанные выше недостатки. В камерах орошения новой конструкции было предложено использовать форсунки двустороннего распыления, которые, как показал опыт эксплуатации, реже засоряются и обеспечивают более тонкое распыление воды [1].

За счет новой конструкции каплеуловителя повышается скорость воздуха до 5 м/с. Поперечное расположение форсунок и применение каплеотбойных цилиндров позволяет уменьшить длину камеры до 1,5 м вместо 2,4 м, а также отказаться от входного каплеуловителя. Благодаря отсутствию входного каплеуловителя стал возможен доступ к форсункам во время работы кондиционера и насоса, что упрощает и резко сокращает трудоемкость их чистки.

Предложенная конструкция камеры обеспечивает необходимую политропную или адиабатную обработку воздуха при меньших энергетических затратах.

Главное преимущество в том, что решение может быть реализовано в камерах орошения любой конструкции, в кондиционерах производительностью от 5 000 до 250 000 м<sup>3</sup>/ч.

Производственные испытания камер орошения, установленных в энергетическом комплексе торгового центра «Три кита» в г. Москве, (рис. 2) подтвердили основные преимущества новой камеры орошения:

более эффективная обработка воздуха при меньшем расходе воды и, соответственно, при меньших энергозатратах;

меньшее количество стояков и форсунок;

меньшая длина по ходу воздуха (1500 вместо 2400 мм);

возможность применения предложенного решения на существующих камерах любой модели и на вновь проектируемом оборудовании производительностью от 5 до 250 тыс. м<sup>3</sup>/ч;

возможность увеличения расхода воздуха на 20...30 % больше номинального при тех же габаритах, так как в камерах устанавливаются более эффективные выходные каплеуловители, работающие при скорости воздуха до 4,5 м/с;

отсутствие входных каплеуловителей, что позволяет контролировать работу камер орошения со стороны входа воздуха при работающем кондиционере и насосе.



Рис. 2. Промышленная камера орошения со стороны входа воздуха в торговом центре «Три кита», г. Москва

Последнее преимущество оказалось решающим при проектировании центральных кондиционеров для объекта, на котором требуется непрерывная работа оборудования в течение 10 000 часов, допускаются только кратковременные отключения на 10...15 минут. Этого времени вполне достаточно для быстрой замены засорившихся форсунок при отключенном насосе и работающем кондиционере, так как форсунки, требующие замены уже выявлены заранее при визуальном осмотре камеры с включенным насосом.

В настоящее время волгоградской компанией «ТЭК» организовано серийное производство двусторонних форсунок и выходных каплеуловителей для новых камер орошения. Подбор оборудования для промышленных и общественных зданий выполняют специалисты НИЦ «Инвент».

---

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Распыливание жидкостей / В. А. Бородин и др. М. : Машиностроение, 1967. 263 с.
2. Хавкин Ю. И. Центробежные форсунки. Л. : Машиностроение, 1976. 168 с.
3. Прилепский Д. В., Тарабанов М. Г. Энергоэффективные камеры орошения для систем вентиляции и кондиционирования воздуха // АВОК. 2012. № 5. С. 24—33.
4. Тарабанов М. Г., Видин Ю. В., Бойков Г. П. Тепло- и массоперенос в камерах орошения кондиционеров. Красноярск, 1974.
5. Коркин В. Д. Исследование дисперсного состава факела центробежных форсунок промывных форсуночных камер кондиционирования воздуха // Материалы научно-технической конференции ВВИТКУ. Вып. 6. Л., 1968.

1. Raspylivanie zhidkostey / V. A. Borodin i dr. M. : Mashinostroenie, 1967. 263 s.
2. Khavkin Yu. I. Tsentrobezhnye forsunki. L. : Mashinostroenie, 1976. 168 s.
3. Prilepskiy D. V., Tarabanov M. G. Energoeffektivnye kamery orosheniya dlya sistem ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukha // AVOK. 2012. № 5. S. 24—33.
4. Tarabanov M. G., Vidin Yu. V., Boykov G. P. Teplo- i massoperenos v kamerakh orosheniya konditsionerov. Krasnoyarsk, 1974.
5. Korkin V. D. Issledovanie dispersnogo sostava fakela tsentrobezhnykh forsunok promyvnykh forsunochnykh kamer konditsionirovaniya vozdukha // Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii VVITKU. Vyp. 6. L., 1968.

© Прилепский Д. В., 2014

Поступила в редакцию  
в ноябре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Прилепский Д. В. Конструктивные особенности камеры орошения с поперечным расположением форсунок // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 177—181.

УДК 697.932.3

**Д. В. Прилепский, М. Г. Тарабанов, В. М. Фокин**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДУШНОГО ВИХРЯ  
ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ФОРСУНОК КАМЕР ОРОШЕНИЯ  
В СИСТЕМАХ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА**

Описана экспериментальная установка и методика проведения исследований по определению положения воздушного вихря относительно оси сопла форсунки и измерению его размеров как на срезе сопла, так и в объеме камеры закручивания форсунки.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** форсуночная камера, центробежная форсунка.

The article describes experimental installation and method to determine the position of the air swirl relative to the axis of the centrifugal nozzle, and measurement dimensions of the air swirl at the nozzle exit and in a volume of centrifugal nozzle.

**К e y w o r d s:** nozzle chamber, centrifugal nozzle.

Для выяснения причины неравномерного распределения воды, а также для уточнения физической картины течения жидкости в центробежных форсунках и построения их теории важное значение имеют исследования воздушного вихря и толщины пленки жидкости в камере закручивания и на срезе сопла форсунки.

До настоящего времени экспериментальные работы по определению указанных характеристик закрученного потока внутри форсунки практически не проводились, что объясняется сложностью выполнения исследований из-за малых размеров форсунки и отсутствием надежной методики эксперимента.

Поэтому при аналитических расчетах толщина пленки жидкости обычно определяется по приближенной формуле (1), полученной для идеальной жидкости:

$$\frac{\delta}{r_c} = \frac{1 - \sqrt{1 - \mu \cos \beta}}{\cos \beta}, \quad (1)$$

где  $\delta$  — толщина пленки после выхода из сопла;  $r_c$  — радиус сопла;  $\mu$  — коэффициент расхода форсунки.

Формула (1) справедлива при истечении жидкости в виде конической пленки с углом  $2\beta$  при вершине и получена из условия равенства расхода жидкости через площадь проходного сечения потока и через площадь отверстия истечения с коэффициентом расхода  $\mu$ .

Толщина кольцевого потока жидкости на срезе сопла  $\delta_0$  непосредственно определяется размером воздушного вихря и может быть выражена через коэффициент заполнения сопла:

$$\delta_0 = (1 - \sqrt{1 - \varphi}) r_c, \quad (2)$$

где  $\varphi = 1 - r_b^2 / r_c^2$ ;  $r_b$  — радиус воздушного вихря на срезе сопла.

При расчетах по (1) и (2) предполагается, что воздушный вихрь в камере закручивания форсунки расположен симметрично относительно оси сопла, и, следовательно, толщина кольцевого потока жидкости одинаковая в поперечном сечении. Непосредственная экспериментальная проверка этого предположения до настоящего времени не проводилась, однако анализ данных [1] по плотности распределения жидкости по сечению факела распыла центробежных форсунок (особенно с одним тангенциальным каналом) указывает на значительную неравномерность расхода. Это позволяет предположить, что толщина пленки различна в поперечном сечении сопла. Знание толщины пленки имеет важное прикладное значение для анализа качества и тонкости распыливания жидкости центробежными форсунками.

В статье описывается экспериментальная установка и методика проведения исследований по определению положения воздушного вихря относительно оси сопла форсунки и измерению его размеров как на срезе сопла, так и в объеме камеры закручивания форсунки. Принципиальная схема установки приведена на рис. 1.

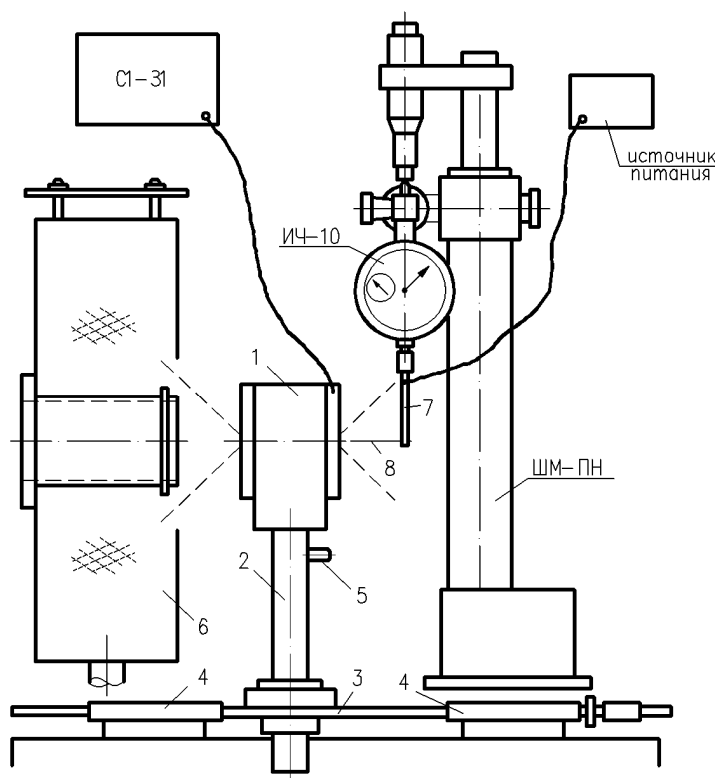


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 — форсунка; 2 — патрубок; 3 — линейка штангенциркуля; 4 — щеки штангенциркуля; 5 — штуцер для манометра; 6 — приемная камера; 7 — державка; 8 — игла

Испытываемая форсунка 1 устанавливается строго вертикально на патрубке 2, жестко закрепленном на подвижной линейке 3 штангенциркуля, которая перемещается в двух (для жесткости) неподвижных щеках 4. Одна щека имеет зажимное устройство с винтом для продольного микроперемещения

и фиксирования положения линейки с точностью до 0,05 мм. В патрубке, непосредственно перед форсункой, имеется штуцер для подключения образцового манометра 5 с ценой деления 4 кПа.

Факел распыла форсунки направляется в приемную камеру 6 диаметром 210 мм через кольцевой зазор шириной 20 мм. В центре камеры имеется сквозное цилиндрическое окно диаметром 30 мм для визуального наблюдения, освещения и фотографирования факела.

Опыты проводили с одно- и двусторонними форсунками. В последнем случае у второго факела также устанавливали приемную камеру. Обе камеры укреплялись на вертикальных подвесках и имели возможность продольного перемещения в соответствии с положением и размером форсунки. В нижней части камер имелись штуцеры для отвода уловленной воды в бак. Для гашения удара факела о стенки камер они были заполнены внутри капроновыми мочалками из тонких спутанных нитей. Все элементы установки, особенно подвижные и микрометрические, были тщательно покрыты слоем технического вазелина, а под установкой был смонтирован поддон для сбора конденсирующейся жидкости.

Метод измерения был основан на разнице в электрической проводимости воздуха (воздушный вихрь) и воды. Практически метод был реализован следующим образом. У сопла форсунки на плоской металлической державке толщиной 0,3 мм устанавливали стальную контактную иглу без острия диаметром 0,51 мм. Державка иглы жестко соединялась со штоком индикатора ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм. Шток индикатора из среднего положения перемещался в поперечном направлении относительно оси сопла с помощью микрометрического винта глубиномера. Индикатор крепился на специальной магнитной стойке типа ШМ-ПН, обеспечивавшей его установку в заданной плоскости (вертикально, горизонтально, наклонно под любым углом). К державке иглы был подведен потенциал от стабилизированного источника питания напряжением 9 В. Магнитная стойка и все элементы, соприкасающиеся с ней, были изолированы от форсунки и контура заземления. Испытываемая форсунка типа Ц2-7 была изготовлена из органического стекла, но имела бронзовые распылители, к которым подключался датчик от осциллографа С1-31.

Измерение воздушного вихря и его положения относительно оси сопла проводили следующим образом. При неработающей форсунке устанавливали контактную иглу точно на срезе сопла форсунки. Для этого иглу выводили примерно на 0,2 мм за диаметр сопла в поперечном направлении и форсунку перемещали в продольном направлении с помощью микрометрического винта штангенциркуля до упора сопла в торец иглы. Момент касания, как и во всех последующих измерениях, фиксировали по сигналу осциллографа. Затем иглу возвращали в плоскость отверстия сопла и форсунку перемещали в направлении иглы на 0,05 мм. После этого проверяли точность установки иглы по диаметру сопла под заданным углом измерения и вдоль оси камеры закручивания форсунки.

В первом случае проверку осуществляли путем измерения несколько раз диаметра сопла с помощью иглы, добиваясь совпадения с ранее замеренным под микроскопом диаметром с точностью до 0,01 мм. Соосность иглы и камеры закручивания проверяли, перемещая форсунку навстречу игле на 10...15 мм и измеряя диаметр сопла в нескольких положениях через каждые 2 мм по длине



по показаниям индикатора. Допустимым принимали такое положение иглы, когда отклонение в показаниях индикатора в крайних положениях форсунки не превышало 0,02 мм. Точная установка иглы осуществлялась с помощью винтов управления магнитной стойки.

После окончательной выверки иглу устанавливали на срезе сопла или на необходимой глубине по оси сопла и к форсунке подавали воду с заданным давлением. При образовании воздушного вихря игла оказывалась изолированной от стенок сопла и потока воды, и сигнал на осциллографе отсутствовал. Затем микрометрическим винтом контактная игла перемещалась в поперечном направлении до касания с поверхностью пленки воды. Следует отметить, что на игле постоянно появлялись мельчайшие капельки воды, которые относились потоком воздуха, эжектируемого струей, от торца иглы. По мере приближения поверхности иглы к пленке жидкости на экране осциллографа появлялся постепенно усиливающийся сигнал. Момент касания очень четко фиксировался на экране резким усилением сигнала и, кроме того, сопровождался появлением звукового сигнала и некоторым скачком стрелки индикатора. После регистрации показания иглу отводили от пленки до разрыва цепи и замер повторяли 6—7 раз. Максимальная разница в показаниях индикатора по семи замерам не превышала 0,03 мм, и за расчетное принимали среднее значение показаний.

После выполнения замеров в двух противоположных точках по диаметру сопла воду отключали и проводили проверку измерений следующим образом. Сопло и иглу высушивали потоком сжатого воздуха и выполняли контрольные замеры диаметра сопла, которые сравнивали с замерами, полученными до подачи воды. Опыт считали правильным, если разница в показаниях индикатора до и после подачи воды не превышала 0,01 мм.

Определение диаметра воздушного вихря и его положения относительно оси сопла выполняли в восьми сечениях. После этого проводили графическую обработку полученных данных. На рис. 2 приведены результаты опытов, проведенных с форсункой Ц2-7 при одно- и двустороннем распылении жидкости.

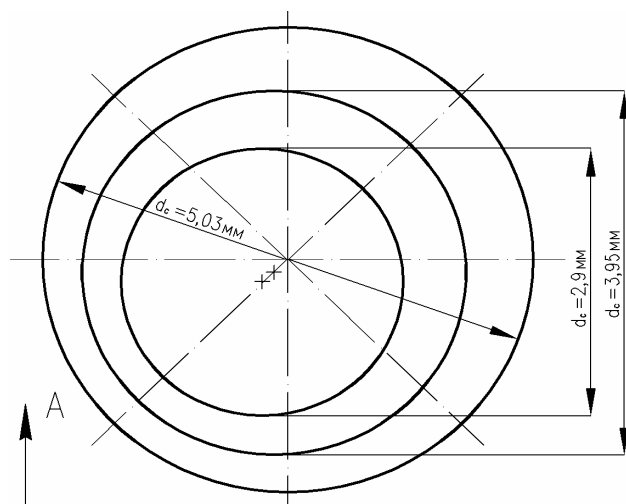


Рис. 2. Результаты экспериментальных замеров диаметров и положения воздушных вихрей на срезе сопла форсунки Ц2-7  $d_c = 5,03$  мм при одно- и двустороннем распылении: А — положение тангенциального канала

Замеры выполнены на срезе сопла. Как видно, воздушные вихри имеют кольцевое сечение, но их оси смещены относительно оси сопла, и толщина пленки жидкости в обоих случаях неодинакова в поперечном сечении. Причем наибольшая толщина пленки наблюдается в зоне, противоположной тангенциальному каналу форсунки.

Измеренные значения диаметров воздушного вихря на срезе сопла и толщины пленки воды при одно- и двустороннем распылении приведены в табл.

| Внутренний диаметр сопла, мм | Одностороннее распыление |                    |      | Двустороннее распыление |                    |      |
|------------------------------|--------------------------|--------------------|------|-------------------------|--------------------|------|
|                              | Диаметр вихря, мм        | Толщина пленки, мм |      | Диаметр вихря, мм       | Толщина пленки, мм |      |
|                              |                          | max                | min  |                         | max                | min  |
| 5,03                         | 2,90                     | 1,42               | 0,71 | 3,95                    | 0,74               | 0,34 |

Увеличение диаметра воздушного вихря при двустороннем распылении подтверждают фотографии (рис. 3).

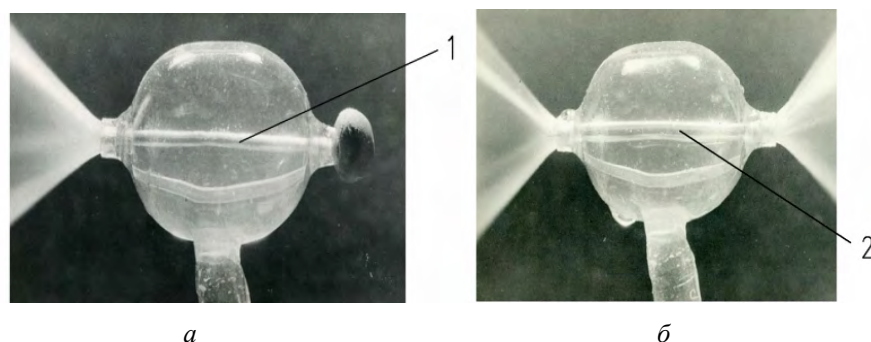


Рис. 3. Фото факелов распыла при одно- (а) и двустороннем (б) распылении: 1 и 2 — воздушный вихрь

Полученные результаты позволили установить реальную физическую причину неравномерного распределения жидкости в факеле распыла центробежных форсунок, которая состоит в том, что пленка жидкости на срезе сопла имеет разную толщину из-за несоосности воздушного вихря и сопла. Указанное смещение вызвано тем, что воздушный вихрь ведет себя как упругое тело, он прогибается внутри камеры закручивания под действием потока жидкости, поступающего в форсунку через тангенциальный канал, и при этом торец вихря на срезе сопла смещается относительно оси сопла.

Результаты исследований имеют важное значение для теории центробежных форсунок, так как многие специалисты связывают с толщиной пленки дисперсность распыла и, кроме того, подтверждают целесообразность применения в камерах орошения форсунок двустороннего распыления, которые, как показал опыт эксплуатации, реже засоряются и обеспечивают более тонкое распыливание воды, что повышает энергетическую эффективность камер орошения [2].

Опыт эксплуатации новых форсуночных камер с форсунками двустороннего распыления на промышленных объектах показал целый ряд преимуществ [3].

Так, применение форсунок двустороннего распыления позволяет улучшить качество распыла воды и сократить энергетические затраты на распыливание.

Был проведен теплотехнический расчет промышленной адиабатной камеры орошения новой конструкции производительностью 60 тыс. м<sup>3</sup>/ч. Камера установлена в энергетическом комплексе торгового центра «Три кита» г. Москвы. Расчет выполнялся по методу Е. Е. Карписа с использованием коэффициента эффективности  $E_a$  [4].

$$E_a = \frac{t_{в1} - t_{в2}}{t_{в1} - t_{w1}},$$

где  $t_{в1}$ ,  $t_{в2}$  — начальная и конечная температуры обрабатываемого воздуха по сухому термометру, °С;  $t_{w1}$  — температура воды, °С.

Воздух в количестве 60 000 м<sup>3</sup>/ч с начальными параметрами  $t_{в1} = 19,6$  °С,  $\phi_1 = 24$  % обрабатывался в камере орошения до конечных параметров  $t_{в2} = 11,5$  °С,  $\phi_1 = 83$  %,  $t_{w1} = 9,5$  °С.

Тогда коэффициент эффективности форсуночной камеры составит:

$$E_a = \frac{19,6 - 11,5}{19,6 - 9,5} = 80 \text{ \%}.$$

В данной форсуночной камере установлено 68 форсунок двустороннего распыления. Задаемся расходом воды  $G_{\text{воды}} = 36\,000$  кг/ч.

Важнейшим фактором, определяющим величину коэффициента эффективности (помимо конструктивных особенностей самой камеры), является коэффициент орошения, рассчитываемый по формуле

$$B = \frac{G_{\text{воды}} (\text{кг/ч})}{G_{\text{воздуха}} (\text{кг/ч})} = \frac{36\,000}{72\,000} = 0,5.$$

Расчетная производительность одной форсунки

$$q_{\text{ф}} = \frac{36\,000}{68} = 529 \text{ кг/ч}.$$

По данным характеристики форсунок, установленных на этой камере, находим, что указанная производительность обеспечивается при давлении воды  $H_p = 2,7$  бар.

Для камеры орошения на параметры  $G_{\text{воды}} = 36$  м<sup>3</sup>/ч и  $H_p = 2,7$  бар был выбран насос фирмы Wilo марки IL 50/180-7,5/2 с  $N_y = 7,5$  кВт, где  $N_{\text{пот}} = 6,7$  кВт.

Была рассчитана аналогичная форсуночная камера фирмы Hidria IMP Klima по программе подбора airCalc++ с расходом воздуха 60 000 м<sup>3</sup>/ч и коэффициентом эффективности  $E_a = 80$  %. На данную камеру установлен насос фирмы Elektrokovina марки VC 50-160/2 с  $N_y = 10$  кВт, где  $N_{\text{пот}} = 8,1$  кВт.

По результатам расчетов видно, что при одинаковой эффективности обработки воздуха применение камеры орошения новой конструкции обеспечивает значительную экономию электроэнергии по сравнению с аналогичной

камерой зарубежного производителя, а значит и сроки ее окупаемости будут значительно ниже, что подтверждает целесообразность применения в камерах орошения форсунок двустороннего распыления.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прилепский Д. В., Тарабанов М. Г. Исследование плотности распределения воды в факелах распыла центробежных форсунок, применяемых в системах кондиционирования воздуха // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2012. Вып. 29(48). С. 160—166.
2. Тарабанов М. Г., Видин Ю. В., Бойков Г. П. Тепло- и массоперенос в камерах орошения кондиционеров. Красноярск, 1974.
3. Тарабанов М. Г., Прилепский Д. В. Энергоэффективные камеры орошения для систем вентиляции и кондиционирования воздуха // АВОК. 2012. № 5. С. 24—33.
4. Баркалов Б. В., Карпис Е. Е. Кондиционирование воздуха в промышленных, общественных и жилых зданиях. М. : Стройиздат, 1971. 269 с.
1. Prilepskiy D. V., Tarabanov M. G. Issledovanie plotnosti raspredeleniya vody v fakelakh raspyla tsentrobezhnykh forsunok, primenyaemykh v sistemakh konditsionirovaniya vozdukha // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2012. Vyp. 29(48). S. 160—166.
2. Tarabanov M. G., Vidin Yu. V., Boykov G. P. Teplo- i massoperenos v kamerakh orosheniya konditsionerov. Krasnoyarsk, 1974.
3. Tarabanov M. G., Prilepskiy D. V. Energoeffektivnye kamery orosheniya dlya sistem ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukha // AVOK. 2012. № 5. S. 24—33.
4. Barkalov B. V., Karpis E. E. Konditsionirovanie vozdukha v promyshlennykh, obshchestvennykh i zhilykh zdaniya. M. : Stroyizdat, 1971. 269 s.

© Прилепский Д. В., Тарабанов М. Г., Фокин В. М., 2014

Поступила в редакцию  
в ноябре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Прилепский Д. В., Тарабанов М. Г., Фокин В. М. Экспериментальное исследование воздушного вихря центробежных форсунок камер орошения в системах кондиционирования воздуха // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 182—188.

## **ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА**

УДК 621.642.37:502.51(282.02)

**К. В. Дружинин**

### **ВОЗДЕЙСТВИЕ ВПХГ В ОТЛОЖЕНИЯХ КАМЕННОЙ СОЛИ НА ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ**

Рассматриваются вопросы, связанные со значимостью подземных хранилищ газа и нефти для России. Освещаются основные виды воздействия ВПХГ на подземные воды, вопросы методологии по охране подземных вод от истощения и загрязнения, в том числе оценка возможности создания новых контрольных и наблюдательных скважин.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** подземные хранилища нефти и газа, газопотребление, технология строительства, производственная среда, скважина.

The paper considers the issues connected with the importance of underground gas and oil storages for the Russian Federation. The author highlights the main types of influence of underground gas and oil storages, considers the methods of protection of underground water against depletion and pollution, as well as gives the assessment of possible construction of new inspection and observation wells.

**К e y w o r d s:** underground gas and oil storages, gas consumption, construction technology, industrial environment, well.

Подземные хранилища газа (ПХГ) являются неотъемлемой частью Единой системы газоснабжения России (ЕСГ) и расположены в основных районах потребления газа. Использование ПХГ позволяет регулировать сезонную неравномерность потребления газа, снижать пиковые нагрузки в ЕСГ, обеспечивать гибкость и надежность поставок газа. Сеть ПХГ обеспечивает в отопительный период до 20 % поставок газа российским потребителям, а в дни резких похолоданий эта величина достигает 30 % [1]. За весь период эксплуатации ПХГ в России (по состоянию на июнь 2010 года) оборот газа в них составил 1900 млрд м<sup>3</sup>. Согласно СНиП 34-02-99 «Подземные хранилища газа, нефти и продуктов их переработки», в состав подземных хранилищ входят:

подземные сооружения, включающие подземные резервуары, вскрывающие вспомогательные горные выработки, буровые скважины и подземные рассолохранилища;

наземные сооружения, включающие здания и сооружения, внутриплощадочные сети, наземные рассолохранилища.

В соответствии с региональным гидрогеологическим районированием, исследованный район относится к Приволжско-Хоперскому (или Сурско-Хоперскому) артезианскому бассейну.

Значительная по мощности толща палеозойских, мезозойских и кайнозойских отложений включает целый ряд напорных водоносных горизонтов. По характеру водообмена можно выделить три зоны:

1) зона активного водообмена до глубины порядка 500 м, включающая водоносные горизонты четвертичных, неогеновых, палеогеновых и меловых отложений;

2) зона затрудненного водообмена, до глубины порядка 1000 м, включающая водоносные юрские и нижнетриасовые горизонты;

3) зона застойного режима, содержащая водоносные горизонты в подсолевых породах нижнепермского докунгурского и каменноугольного возраста.

Влияние подземных хранилищ газа в отложениях каменной соли на водоносные горизонты обуславливается большим объемом водозабора подземных вод при строительстве подземных резервуаров, составляющим миллионы кубометров, закачкой миллионов кубометров строительного рассола в пласт-коллектор, а также возможным загрязнением подземных вод хранимыми продуктами и рассолом при их утечках через дефекты подземных резервуаров и нагнетательных скважин [1, 2, 3].

К основным геоэкологическим процессам ПХГ в каменной соли относятся: конвергенция (уменьшение объема) резервуаров в каменной соли под действием горного давления; оседание поверхности земли при создании подземных выработок; сработка (понижение) напоров водоносных горизонтов, эксплуатируемых подземными водозаборами; повышение напоров горизонта захоронения рассола, формирование в нем линзы рассола.

К процессам аварийного характера относятся: загрязнение при авариях трубопроводов почв, приповерхностных грунтов, подземных вод рассолом; загрязнение водоносных горизонтов при перетоках высокоминерализованных вод из горизонта захоронения строительного рассола; образование техногенных залежей и распространение газа по коллекторам при перетоках газа из подземных резервуаров; смятие обсадных колонн технологических скважин в слоях бишофита.

В управлении геоэкологическими процессами выделяют два этапа [4]:

1) прогнозирование на этапе проектирования и принятие проектных решений;

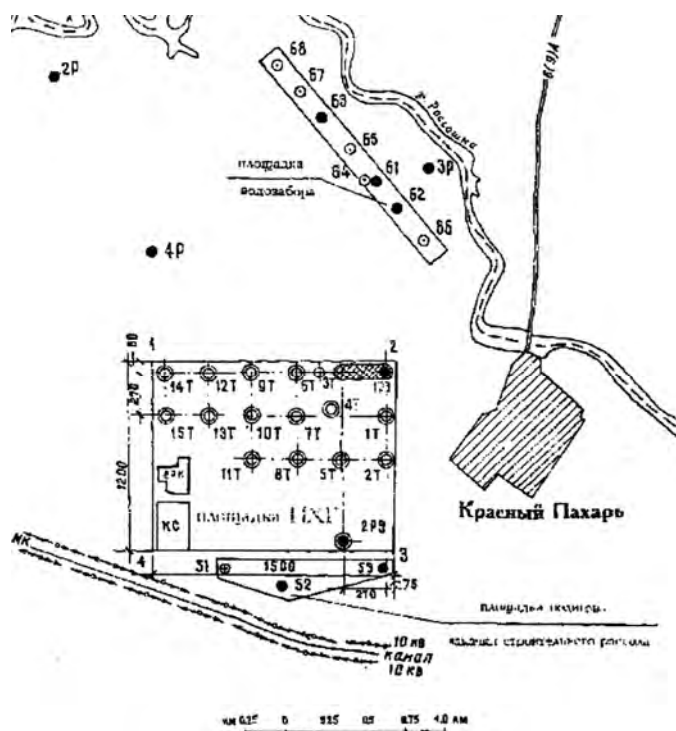
2) контроль и прогноз на этапе строительства и эксплуатации, с соответствующей корректировкой инженерных решений и технологий.

Основным отличием этапов проектирования ПХГ и реализации проекта в управлении геоэкологическими процессами является то, что на втором этапе эти процессы могут непосредственно наблюдаться, и, следовательно, соответствующие оценки и прогнозы становятся более реалистичными.

Основными видами воздействий на водные системы будет их загрязнение, откачивание подземных вод, а также подземное захоронение строительного рассола.

Загрязнение р. Россошки возможно двумя путями. Загрязняющие компоненты могут, попадая первоначально на почву, переноситься талыми и ливневыми водами к руслу реки. Также возможно просачивание загрязняющих веществ с поверхности в грунтовые воды и перенос их к реке грунтовыми потоками.

Загрязнение первых от поверхности водоносных горизонтов будет происходить описанным выше путем, т. е. просачивание вниз через зону аэрации, сложенную в основном покровными суглинками, обеспечит попадание



Строительный рассол, который будет закачиваться в поглощающие скважины, может проникать в вышележащие водоносные горизонты, как фильтруясь через разделяющую толщу глин и литологические окна в ней (что представляется весьма маловероятным), так и просачиваясь через заколонное пространство скважин различного назначения в случае недостаточной герметичности затрубного пространства [5].

Существенное влияние на уровни подземных вод окажет их откачивание подземными водозаборами — хозяйственно-питьевым и техническим. Произойдет значительное снижение напоров в эксплуатируемых горизонтах, особенно в водоносном горизонте, используемом для технического водоснабжения.

Далее автором статьи произведен анализ и оценка воздействия водозабора хозяйственно-питьевого водоснабжения. Эксплуатируемые водоносные горизонты — водоносный комплекс камышинских и сызранских отложений. Потребность в воде питьевого качества составляет не более  $100 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

Учитывая развитие водоносного комплекса, принимая в качестве аналога гидродинамических параметров величины, полученные при разведке Городищенского месторождения подземных вод камышинской и сызранской свит палеогена, расчетное понижение в водозаборной скважине хозяйственно-питьевого назначения составит на конец эксплуатации (при  $t = 10^4 \text{ сут}$ ) 2,53 м. Допустимое понижение — 36 м, в том числе 21 м за счет снятия напора и 15 м за счет частичного осушения сызранско-камышинского водоносного комплекса. То есть эксплуатационные запасы хозяйственно-питьевого водоснабжения полностью обеспечены, а изъятие вод из камышинско-сызранского водоносного комплекса, ввиду малых суточных отборов и незначительного понижения уровня, можно считать процессом, не причиняющим ущерба гидрогеологическому режиму подземных вод.

Произведен анализ воздействия технического водозабора на окружающую среду. Для обеспечения эксплуатационными запасами строительства ПХГ в количестве  $7200 \text{ м}^3/\text{сут}$  создан водозабор, состоящий из шести эксплуатационных и одной резервной скважины с расстояниями между скважинами 250 м (рис. 2).



Рис. 2. Схема расположения контрольных и наблюдательных скважин

Предусматривается совместная эксплуатация двух водоносных горизонтов нижнего триаса (горизонт  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ ), залегающих в интервале глубин 602...700 м.

Исходные пластовые воды хлоридно-кальцевого типа с минерализацией 7,1...7,5 г/л. Дебит водозаборной скважины  $1200 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Время строительства, без учета возможных технических или аварийных перерывов, составляет 20 лет. Общее количество воды, требуемое для строительства подземных резервуаров,  $52,56 \text{ млн м}^3$  (без учета вторичного использования). Статический уровень при вскрытии горизонтов  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$ ,  $\Gamma_3$  установлен на абсолютных отметках 52,5...53,3 м, т. е. на 26,8...29,6 м ниже земной поверхности.

При проведении опытно-фильтрационных работ дебиты скважин составили: скв. № 61 —  $1555 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; скв. № 62 —  $1728 \text{ м}^3$ ; скв. № 63 —  $1840 \text{ м}^3/\text{сут}$ . В процессе проведения опытных откачек зафиксирован значительный вынос песка



из скважин (до 30 %), но к моменту окончания опытных откачек вынос песка снижен до 1...5 %. При проведении длительной кустовой откачки процент выноса песка на момент остановки компрессора составлял менее 1 %. Гидродинамический метод широко используется для оценки подземных вод глубоких горизонтов артезианских бассейнов предгорного, межгорного и платформенного типов. К последнему и относится Приволжско-Хоперский артезианский бассейн, в пределах которого расположена Россошинская площадь.

Геолого-структурные и гидрогеологические особенности Приволжско-Хоперского артезианского бассейна позволяют представить гидродинамическую обстановку триасового водоносного комплекса в виде полуограниченного пласта [5].

Северо-западной границей этой водонапорной системы является район выходов триаса на поверхность в пределах Доно-Медведицких дислокаций, который совпадает с областью питания основных водоносных комплексов данного бассейна. Россошинский водозабор удален от северо-западной границы на расстояние до 80 км. Значительная удаленность позволяет пренебречь влиянием этой границы на динамику снижения уровня в скважинах водозабора в процессе их эксплуатации. На юго-востоке триасовый водоносный комплекс ограничен Прикаспийским уступом, который осложнен рядом сбросовых нарушений. Расстояние до юго-восточной границы составляет 25 км. Расход на этой границе, представляющей тектоническое нарушение (Волжский сброс), настолько мал, что им можно пренебречь.

Расчеты водозаборов в ограниченных пластах осуществляются с использованием метода зеркальных отражений, который заключается в том, что влияние на работу скважины или водозабора границ пласта аппроксимируется влиянием зеркально-отраженных от этих границ скважин.

Исходя из степени изученности месторождения, принципов его гидрогеологической модели, принятой расчетной схемы, методики и результатов опытно-фильтрационных работ подсчет эксплуатационных запасов проведен гидродинамическим методом.

Расчет проведен по формуле Тейса для модели полубесконечного однородного пласта.

Коэффициент гидропроводности в расчете принят равным 8500 д·см/спз, а коэффициент пьезопроводности 55 300 см<sup>2</sup>/сек. Эти параметры являются средними значениями величин, полученных для горизонта  $\Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3$  по материалам гидропослушивания.

При расчетах принимается, что каждая из шести скважин работает с дебитом, равным 1200 м<sup>3</sup>/сут в течение 104 сут. Максимальное падение уровня на конец эксплуатации отмечено в центральной скважине № 65, которое составит 121,12 м.

Наряду с подсчетом эксплуатационных запасов был проведен расчет изменения понижений в пласте  $\Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3$  после 20 и 27 лет эксплуатации. Отбор воды из скважин окажет существенное влияние на распределение давления в эксплуатируемых горизонтах. Так через 20 лет эксплуатации (срок строительства ПХГ) понижение, равное 11,7 м, что составляет 100/0 от максимального падения уровня в центре водозабора, будет зафиксировано на расстоянии 58,1 км от него. А через 27 лет 10 % от максимального падения (12,1 м) фиксируется на расстоянии 63,1 км от водозабора.

Эксплуатация Россошинского водозабора, несомненно, окажет определенное влияние на гидродинамическую обстановку в горизонтах  $\Gamma_1 + \Gamma_2$ . Как показывают расчеты депрессионная воронка будет распространяться

и в течение срока строительства ПХГ и расчетного срока эксплуатации, соответственно через 20 и 27 лет ее радиус составит 58,1 и 63,1 км. С другой стороны, поскольку воды триасовых горизонтов  $\Gamma_1 + \Gamma_2$  в зоне затрудненного водообмена нигде не используются, то данный водозабор не представляет никакой опасности для водонапорной системы этого комплекса.

Достаточная глубина залегания продуктивных горизонтов и их изолированность от вышележающих водоносных пластов юры, используемых для бальнеологических целей, и питьевых горизонтов альб-сеноманского и палеогенового возрастов свидетельствует также о невозможности влияния на них работы водозабора.

Закачивание строительного рассола в подземный пласт приведет к созданию в этом пласте линзы рассола, а также значительному увеличению напоров на большой площади.

После создания подземных емкостей в них будет закачиваться газ под давлением, значительно превышающим пластовое. В случае недостаточной герметичности емкостей газ через затрубное пространство может проникать в вышележащие водоносные горизонты и распространяться по ним в сторону воздымания пластов (на северо-запад).

Мониторинг подземных вод Волгоградского ПХГ является составной частью геоэкологического мониторинга хранилища и организуется как единая комплексная система пространственно-временного контроля за состояниями и изменениями подземной среды в зоне действия входящих в состав ПХГ сооружений и объектов, в которых подземные водоносные горизонты выступают в качестве технологических элементов хранилища (горизонты технического и хозяйственно-питьевого водоснабжения, пластколлектор для закачки рассола), и их оптимизации. Для этой цели на Волгоградском ПХГ предусмотрено создание сети контрольных и наблюдательных скважин, оборудованных на различные водоносные горизонты. Назначение наблюдательных скважин — отслеживание измерений гидродинамического и гидрохимического режима водоносных горизонтов, используемых для закачки рассола и технического водоснабжения. В контрольных скважинах осуществляются контроль состояния неэксплуатирующихся водоносных горизонтов, наблюдения за возможными изменениями их гидродинамического режима (ниже этот вопрос будет рассмотрен более подробно).

Мониторинг подземных вод проводится в два этапа: базовый и текущий (этапы строительства и эксплуатации).

Основная задача базового мониторинга подземных вод — определение естественного (фоновое) состояния водоносных горизонтов в зоне действия объектов и сооружений. Базовый мониторинг включает в себя анализ исследований, проведенных ранее в процессе геологоразведочных работ, освоение путем эрлифтной откачки вновь пробуренных контрольных и наблюдательных скважин, совмещенное с локальными и площадными гидродинамическими исследованиями водоносных горизонтов, намеченных для наблюдения и контроля, определение химического состава пластовых вод, а также длительные наблюдения в скважинах за уровнем вод для определения его статического положения, входящих в состав ПХГ.

Базовый мониторинг осуществляется до начала активной фазы строительства ПХГ. Результаты исследований обрабатываются и формируются в банк данных, отражающих фоновые показатели гидродинамических и гидрохимических

режимов изучаемых водоносных горизонтов. Подобные данные дадут возможность вычленить влияние ПХГ на неэксплуатируемые водоносные горизонты в случае возможного изменения их режима, а также осуществлять наблюдение за работой технического водозабора и полигона закачки рассола. Следует отметить, что запроектированное в ТЭО Волгоградского ПХГ ООО «Подземгазпром» (М., 1998) количество и расположение контрольных и наблюдательных скважин (достаточный минимум) позволяет адекватно отразить состояние подземных горизонтов. По результатам базового мониторинга их количество, расположение, контролируемые параметры могут быть скорректированы.

Анализ результатов, полученных в процессе геоэкологических исследований, дает основание утверждать, что производственная деятельность в период строительства Волгоградского ПХГ не оказывает существенного негативного влияния на качество подземных вод, состояние которых оценивается как стабильно удовлетворительное.

Следует отметить, что количество и расположение контрольных и наблюдательных скважин позволяет адекватно отразить состояние подземных горизонтов. На рис. 2 показана схема расположения контрольных и наблюдательных скважин.

При пуске в работу КС необходимо создать наблюдательные скважины гидрохимических измерений для отслеживания перетоков газа в вышележащие водоносные горизонты.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Экологическая безопасность строительства и эксплуатации подземных хранилищ газонефтепродуктов в отложениях каменной соли / О. Е. Аксютин, В. А. Казарян, А. Г. Ишков и др. М. ; Ижевск : НИЦ «РХД», 2010. 420 с.
2. *Сидоренко М. В.* Подземное хранение газа. М., 1965.
3. *Смирнов В. И.* Строительство подземных хранилищ газа : пособие для вузов. М. : Газойл пресс, 2000.
4. *Королев В. А.* Мониторинг геологической среды. М. : Изд-во МГУ, 1995.
5. Отчет о результатах разведочных работ для создания водозабора на Россошинской площади с целью технического водоснабжения Волгоградского ПХГ с подсчетом эксплуатационных запасов на 1.07.98 г. (Россошинское месторождение подземных вод) / В. М. Лихолатников, Н. В. Бондаренко, Ю. М. Бутковский и др. М., 1998. 121 с.
1. Ekologicheskaya bezopasnost' stroitel'stva i ekspluatatsii podzemnykh khranilishch gazonefteproduktov v otlozheniyakh kamennoy soli / O. E. Aksyutin, V. A. Kazaryan, A. G. Ishkov i dr. M. ; Izhevsk : NITs «RKhD», 2010. 420 s.
2. *Sidorenko M. V.* Podzemnoe khranenie gaza. M., 1965.
3. *Smirnov V. I.* Stroitel'stvo podzemnykh khranilishch gaza : posobie dlya vuzov. M. : Gazoyl press, 2000.
4. *Korolev V. A.* Monitoring geologicheskoy sredy. M. : Izd-vo MGU, 1995.
5. Otchet o rezul'tatakh razvedochnykh rabot dlya sozdaniya vodozabora na Rossoshinskoy ploshchadi s tsel'yu tekhnicheskogo vodosnabzheniya Volgogradskogo PKhG s podschetom ekspluatatsionnykh zapasov na 1.07.98 g. (Rossoshinskoe mestorozhdenie podzemnykh vod) / V. M. Likholatnikov, N. V. Bondarenko, Yu. M. Butkovskiy i dr. M., 1998. 121 s.

© Дружинин К. В., 2014

Поступила в редакцию  
в декабре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Дружинин К. В. Воздействие ВПХГ в отложениях каменной соли на подземные воды // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 189—195.

УДК 719:72:622.691.4.053

**М. С. Жатикова**

**УЧЕТ ФАКТОРА НАЛИЧИЯ ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ  
И ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ЭКОЛОГИЧЕСКОМ  
КАРТОГРАФИРОВАНИИ ТРАССЫ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА**

Приведены материалы, характеризующие важность учета фактора наличия историко-культурного наследия и особо охраняемых территорий при комплексном экологическом картографировании трассы магистрального газопровода. Представлена информация о наличии природных и культурных памятников на территории Волгоградской области, в частности находящихся на территории трасс магистрального трубопровода «Ал. Гай — Острогжск».

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** трасса магистрального газопровода, экологическое картографирование, линейные объекты, особо охраняемые территории, историко-культурное наследие, муниципальные районы.

The article provides the materials describing the importance of taking into account the factor of historical and cultural heritage and specific protected areas when completing the complex ecological mapping of the main gas pipeline route. The information on the availability of natural and cultural monuments on the territory of Volgograd Oblast is provided, in particular concerning monuments on the territory of pipeline routes "Al. Guy — Ostrogozhsk".

**K e y w o r d s:** main gas pipeline route, ecological mapping, linear objects, specific protected territories, historical and cultural heritage, municipal districts.

Магистральный трубопровод представляет собой открытую систему, имеющую определенную степень организованности. Данная система проявляется как целостный материальный объект, представляющий собой закономерно обусловленную совокупность функционально взаимодействующих элементов.

Магистральный газопровод является мощным источником воздействия на природную систему. Множество разнообразных объектов и факторов, подвергающихся воздействию со стороны газопровода, определяют необходимость на первом этапе исследовать воздействие каждого из них с определением степени влияния. К объектам окружающей среды, подвергающимся воздействию магистрального трубопровода, в наших исследованиях были отнесены семь компонентов (человек, растительность, подземные воды, памятники, почва, птицы, животные). Таким образом, при эксплуатации магистральных газопроводов на эти компоненты оказывается негативное воздействие, которое графически можно представить в виде пирамиды [1] (рис. 1).

В экологическом отношении магистральные газовые трубопроводы представляют собой исключительно специфические сооружения. Это объясняется протяженностью трубопроводов, достигающих нескольких тысяч километров, и в территориальном плане они объединены в широко разветвленную транспортную систему подачи газа. В этой связи становится очевидным, что даже однотипная по конструктивно-технологическим параметрам эксплуатация магистральных трубопроводов в различных территориальных районах ведет к различным экологическим последствиям [1, 2].



Рис. 1. Пирамида воздействия магистрального трубопровода на природные объекты

Трасса, пролегающая по территории Волгоградской и Воронежской областей (участок магистрального газопровода «Ал. Гай — Острогожск» диаметром 1020 мм, длиной 1100 км), пересекает следующие муниципальные районы: Палласовский, Николаевский, Быковский, Камышинский, Ольховский, Фроловский, Михайловский, Кумылженский, Алексеевский и Нехаевский (Волгоградская область), Калачеевский, Каменский, Лискинский, Острогожский и Павловский (Воронежская область), на территории которых имеется значительное количество особо охраняемых территорий и объектов историко-культурного наследия.

Для определения оценки воздействия магистрального газопровода на особо охраняемые территории и историко-культурное наследие необходимо составить карту с обозначением на ней особо охраняемых природных и исторических территорий в соответствии с Федеральным законом «Об особо охраняемых природных территориях» от 14.03.1995 г. № 33-ФЗ (ред. от 30.12.2001).

Анализ по количеству и структуре охраняемых природных территорий муниципальных образований Волгоградской области, по которым проходит магистральный газопровод, показал, что наибольшая площадь охраняемых территорий находится в Палласовском муниципальном районе. Большие площади охраняемых территорий в Камышинском муниципальном районе.

Наибольшее количество особо охраняемых природных территорий в Камышинском, Кумылженском, Палласовском муниципальных районах. Среднее число особо охраняемых природных территорий находится в Нехаевском, Николаевском, Ольховском, Фроловском муниципальных районах.

В Волгоградской области по количеству объектов культурного наследия можно выделить 5 групп муниципальных районов:

- 1) культурные центры высокого значения (Даниловский, Дубовский, Се-  
рафимовичский, Урюпинский муниципальные районы);
- 2) культурные центры среднего значения (Иловлинский, Ленинский,  
Палласовский, Светлоярский, Старополтавский муниципальные районы);
- 3) культурные центры малого значения (Алексеевский, Городищеский,  
Калачевский, Котельниковский, Котовский, Кумылженский, Николаевский,  
Октябрьский, Среднеахтубинский муниципальные районы);
- 4) районы с небольшим количеством объектов культурного наследия  
(Еланский, Жирновский, Камышинский, Киквидзенский, Нехаевский, Новоан-  
нинский, Ольховский, Суровикинский, Фроловский муниципальные районы);

5) отсутствие объектов культурного наследия (Быковский, Клетский, Михайловский, Новониколаевский, Руднянский, Чернышковский муниципальные районы).

При анализе трассы «Ал. Гай — Острогожск» выявлено, что районы, через территорию которых проходит трасса магистрального газопровода, обладают историко-культурным наследием высокой значимости. Среди них такие районы, как Палласовский, Кумылженский, Николаевский, Камышинский, Нехаевский и Фроловский (рис. 2).

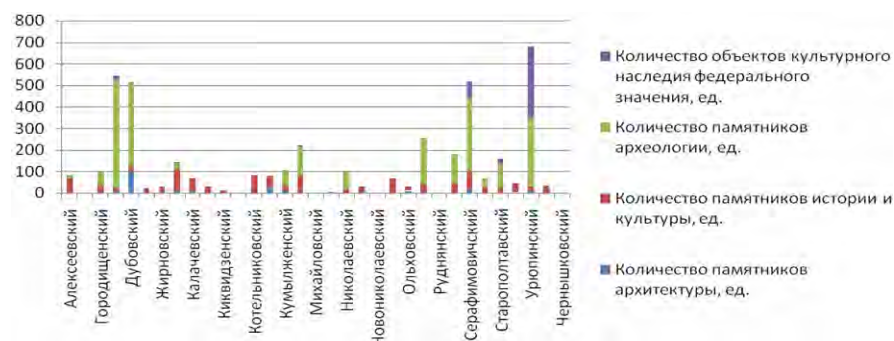


Рис. 2. Наличие объектов культурного наследия в муниципальных районах Волгоградской области

Таким образом, в экологическом картографировании трассы магистрального газопровода при комплексной оценке воздействия объекта сети газопровода на окружающую среду одним из важнейших факторов является историко-культурное наследие. На территории исследования имеется значительное количество особо охраняемых природных территорий и объектов культурного наследия, которые испытывают регулярное воздействие от линейных объектов. Результаты исследования данного компонента сведены в карту «Историко-культурное наследие. Особо охраняемые территории» и учтены при комплексной оценке воздействия трассы магистрального газопровода.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ананенков А. Г., Ставкин Г. П., Овчинников И. П. Элементы системного подхода к проблемам окружающей среды на Ямбургском ГКМ // Экология газовой промышленности. Приложение к журналу «Газовая промышленность». 1999. № 2. С. 57—58.
2. Грива Г. И., Кононов В. И. Обеспечение экологической стабильности объектов ОАО «Газпром» в Западной Сибири. № 5. М. : ИРЦ Газпром, 2000. С. 56—60.
1. Ananenkov A. G., Stavkin G. P., Ovchinnikov I. P. Elementy sistemnogo podkhoda k problemam okruzhayushchey sredy na Yamburgskom GKM // Ekologiya gazovoy promyshlennosti. Prilozhenie k zhurnalu «Gazovaya promyshlennost'». 1999. № 2. S. 57—58.
2. Griva G. I., Kononov V. I. Obespechenie ekologicheskoy stabil'nosti ob"ektov OAO «Gazprom» v Zapadnoy Sibiri. № 5. M. : IRTs Gazprom, 2000. S. 56—60.

© Жатикова М. С., 2014

Поступила в редакцию  
в декабре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Жатикова М. С. Учет фактора наличия историко-культурного наследия и особо охраняемых территорий при комплексном экологическом картографировании трассы магистрального газопровода // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 196—198.

УДК 712.4:551.584.5

**В. В. Прокопенко, О. А. Ганжа**

# **РАЗРАБОТКА СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА ЛАНДШАФТНО-РЕКРЕАЦИОННОЙ ТЕРРИТОРИИ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА ВОЛГОГРАДА**

Разработана статистическая модель, которая отражает основные закономерности влияния антропогенных факторов на показатель качества ландшафтно-рекреационной территории, с использованием аналитических методов и регрессионного анализа.

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

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

**К e y w o r d s:** system of landscaping of a city, landscape and recreation territory.

В настоящее время в градостроительной практике при ландшафтно-рекреационном проектировании понятие «природный ландшафт» относят к противопоставлению между свободной территорией, т. е. занятой лесами, парками, садами и т. д., и территорией, имеющей антропогенное происхождение.

Антропогенный ландшафт — это ландшафт, состоящий из взаимодействующих природных и антропогенных компонентов и формирующийся под влиянием деятельности человека и природных процессов. Освоение человеком территорий вызывает дробление ландшафта на части. Появляются новые факторы, влияющие на развитие и облик ландшафта, которые сильно изменяют природный ландшафт. Во-первых, это элементы, изменяющие земную поверхность: водоемы, автомобильные и железные дороги, отвалы пустой породы, заброшенные карьеры и прочие неудобные земли. Во-вторых, элементы, изменяющие объемно-пространственную структуру ландшафта, населенных пунктов, промышленных сооружений, сети электропередач и прочих сооружений [1].

Хозяйственная деятельность человека оказывает влияние на природный ландшафт, создавая антропогенный ландшафт, который, в свою очередь, образует систему «Город». В системе антропогенного ландшафта выделяется рекреационная территория города, которая становится центром соединения человека с природой. В связи с ускоренными темпами развития общества, застройкой свободных территорий, влияния антропогенных факторов, которые не только негативно влияют на человека, происходит разрушение и ослабление функциональных свойств рекреационной территории. В настоящее время трудно судить о реальном взаимодействии природных компонентов и антропогенных факторов, которое могло бы сбалансировать влияние системы «Города» на рекреационную территорию [2].

В городской агломерации присутствуют три категории ландшафта:

1) естественный ландшафт — в городе имеет временный характер и сохраняет свой облик лишь в новом городе или его новых районах;

2) естественный ландшафт — деградирует как природная данность и приобретает антропогенные черты, иногда неблагоприятные для человека;

3) модернизированные сегменты города — формируются полностью при преобразовании «искусственного» ландшафта, среди которых есть и застроенные территории, и озелененные пространства.

Это позволяет характеризовать городские ландшафты как культурные или антропогенные, подчиняющиеся общим закономерностям эволюции природы. Противопоставление городских ландшафтов природным в функциональном отношении неизбежно.

Анализ ряда работ по данной тематике позволил выделить основную модель взаимодействия городской среды и рекреационной территории (рис. 1).

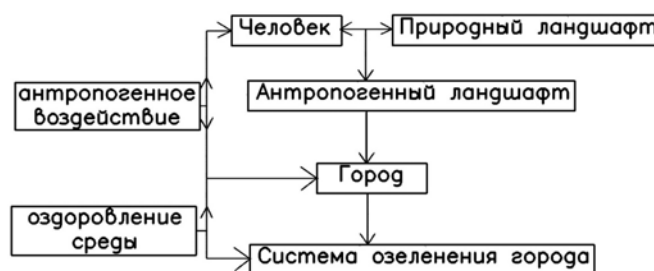


Рис. 1. Взаимодействие системы «Город» и системы озеленения

Модель позволяет проследить взаимодействия двух систем: «Город» и «Ландшафтно-рекреационная территория». Человек создает и управляет системой «Город», тем самым способствует развитию антропогенного изменения природного ландшафта. В городской агломерации именно система озеленения является наследником природного ландшафта. Таким образом, человек создает и управляет двумя системами. Первая — в виде антропогенного воздействия городской среды с множеством групп факторов. Вторая — в виде оздоровляющей среды, которая представляет собой систему озеленения города, являющейся мощным средством регенерирования среды обитания человека. Необходимо достигнуть состояние уравновешенности и устойчивости двух систем.

Одним из аспектов градостроительного подхода к ландшафту является исследование его состояния в городской среде. Городская среда жизни представляет собой сочетание искусственно созданных элементов и условий жизни, культурной среды и элементов естественной природы. Оценка состояния среды жизни города включает оценку множества сред и факторов: воздушно-го бассейна, водных объектов, геологической среды и нарушенности территории, почв, растительного мира, в частности оценка качества озелененных территорий, экологических критериев — деградации озеленения, выполнения защитной функции, рациональное соотношение озелененных и застроенных территорий [3]. Основная задача в сфере развития рекреационных территорий состоит в создании «хороших» биогеоценозов, т. е. ландшафтов, которые в условиях прогрессирующей урбанизации обладали бы повышенной устойчивостью к воздействию на них хозяйственной деятельности человека [4]. При осуществлении оценки ландшафтно-рекреационной территории города на разных стадиях градостроительного проектирования возможно установить достижение выполнения ее функциональных санитарных и эстетических функций.



При исследовании процесса влияния и взаимодействия градостроительных систем и ландшафтно-рекреационной территории возникает задача проведения оценки качества ландшафтно-рекреационной территории по множеству факторов, которые оказывают влияние на состояние данной территории (рис. 2).



Рис. 2. Факторы, влияющие на состояние ландшафтно-рекреационной территории

Решение поставленной задачи возможно с применением комплекса аналитических и статистических методов экспертных оценок, анализа иерархии, корреляционно-регрессионного анализа.

В результате применения метода экспертных оценок и метода анализа иерархии проведен отбор факторов, оказывающих влияние на показатель качества ландшафтно-рекреационной территории. Из группы антропогенных факторов для проведения анализа выбраны выбросы загрязняющих веществ (оксид углерода  $\text{CO}$ ,  $\text{мг/м}^3$ ) и шум, дБА, а из группы планировочных факторов — площадь озеленения, га; количество деревьев, шт., выделение кислорода, наличие растительности на ландшафтно-рекреационной территории, %; наличие защитной полосы; количество пород деревьев, шт., и площадь территории объекта, га. В целях определения влияния факторов на показатель качества ландшафтно-рекреационной территории проведен корреляционный анализ (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

*Корреляционная зависимость факторов, влияющих на показатель качества ландшафтно-рекреационной территории*

| Наименование фактора     | Значение коэффициента корреляции | Теснота связи        |
|--------------------------|----------------------------------|----------------------|
| Шум, дБА                 | 0,328                            | Умеренная и прямая   |
| Количество деревьев, шт. | –0,758                           | Высокая и обратная   |
| Наличие защитной полосы  | –0,495                           | Умеренная и обратная |

В результате проведения регрессионного анализа получено уравнение статистической модели:

$$K_{\text{ЛРТ}} = 0,32 + 0,008 X_1 - 0,0006 X_2 - 0,088 X_3, \quad (1)$$

где  $X_1$  — фактор шумового загрязнения;  $X_2$  — количество деревьев и  $X_3$  — наличие защитной полосы.

Адекватность полученного уравнения регрессии подтверждена величиной множественного коэффициента детерминации  $R^2 = 0,887$ , свидетельствующего, что 88,7 % вариации показателя качества объясняется вариацией трех факторов. Указанный уровень влияния достаточно высок, что свидетельствует о включении в модель факторов, оказывающих существенное влияние на показатель качества ландшафтно-рекреационной территории. В результате проведенной проверки значимости коэффициентов регрессии на основе  $t$ -критерия Стьюдента сделан вывод об их значимости. Знак, соответствующий каждому из факторов, представленных в уравнении (1), показывает направление влияния фактора на изменения показателя качества ландшафтно-рекреационной территории [5].

В качестве статистических показателей оценки точности полученной модели определены: среднее квадратичное отклонение  $\sigma_{\varepsilon}$ , средняя ошибка аппроксимации  $\bar{\varepsilon}$ , коэффициент сходимости  $\varphi^2$ , коэффициент детерминации  $R^2$ . В результате проведенного расчета среднее квадратичное отклонение  $\sigma_{\varepsilon} = 0,066$ , средняя ошибка аппроксимации  $\bar{\varepsilon} = 7,36\%$  (не превосходит 15 %), значение коэффициента детерминации  $R^2 = 0,70$  (соответствует условию  $R \geq 0,70$ ), что подтверждает работоспособность модели. Полученную модель предлагается использовать на стадии проектирования генерального плана и реконструкции города: на стадии проектирования — обосновать актуальность объектов ландшафтно-рекреационной территории, а на стадии реконструкции — предоставить механизм проведения оценки существующих озелененных пространств.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Владимиров В. В., Микулина Е. М., Яргина З. Н. Город и ландшафт. М. : Мысль, 1986. 238 с.
2. Прокопенко В. В., Косицына Э. С. Система компонентов городского ландшафта // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архит. 2012. Вып. 28(47). С. 301—307.
3. Тетюр А. Н. Городская экология. 2-е изд., стер. М. : Издательский центр «Академия», 2007. 336 с.
4. Прокопенко В. В. Оценка индекса качества ЛРТ г. Волгограда : Материалы II Российской науч.-техн. интернет-конф. «Состояние, проблемы и перспективы развития социально-ориентированного строительного комплекса на региональном уровне». Волгоград, 2012. С. 98—101.
5. Ганжа О. А., Соловьева Т. В. Разработка статистической модели, устанавливающая зависимость эквивалентного уровня звука в зоне регулируемого перекрестка от планировочных и транспортных факторов // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архит. 2008. Вып. 11(30). С. 158—162.
1. Vladimirov V. V., Mikulina E. M., Yargina Z. N. Gorod i landshaft. M. : Mysl', 1986. 238 s.
2. Prokopenko V. V., Kositsyna E. S. Sistema komponentov gorodskogo landshafta // Vestnik Volgogr. gos. arkh.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkh. 2012. Vyp. 28(47). S. 301—307.
3. Tetior A. N. Gorodskaya ekologiya. 2-e izd., ster. M. : Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2007. 336 s.
4. Prokopenko V. V. Otsenka indeksa kachestva LRT g. Volgograda : Materialy II Rossiyskoy nauch.-tekhn. internet-konf. «Sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya sotsial'no-orientirovannogo stroitel'nogo kompleksa na regional'nom urovne». Volgograd, 2012. S. 98—101.
5. Ganzha O. A., Solov'eva T. V. Razrabotka statisticheskoy modeli, ustanavlivayushchaya za-visimost' ekvivalentnogo urovnya zvuka v zone reguliruемого perekrestka ot planirovochnykh i transportnykh faktorov // Vestnik Volgogr. gos. arkh.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkh. 2008. Vyp. 11(30). S. 158—162.

© Прокопенко В. В., Ганжа О. А., 2014

Поступила в редакцию  
в ноябре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Прокопенко В. В., Ганжа О. А. Разработка статистической модели оценки показателя качества ландшафтно-рекреационной территории на примере города Волгограда // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 199—202.

УДК 502.3:504.5:725.573

**В. Ф. Сидоренко, Н. В. Сапожкова, А. Н. Чеснокова**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТОМ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ И ПОЧВ ВБЛИЗИ ДОШКОЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ**

Проведен анализ негативного воздействия отработавших газов автотранспорта на окружающую среду и определено их влияние на состав почв в примагистральной территории вблизи дошкольных образовательных учреждений.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** источник загрязнения, загазованность, вредные выбросы автотранспорта, примагистральная территория.

The analysis of negative impact of exhaust gases of motor transport on the environment is carried out, and their influence on soil structure near roads and not far from pre-school institutions is defined.

**К е у w o r d s:** source of pollution, gas-polluted area, harmful emissions from vehicles, territories near roads.

На сегодняшний день достаточно актуален вопрос нехватки мест в детских дошкольных учреждениях. Решением этой проблемы может стать строительство новых детских садов в условиях сложившейся застройки, в том числе вблизи существующих автомагистралей различных категорий. Сейчас транспортно-дорожный комплекс крупного города — один из основных источников загрязнения окружающей среды: воздушного и водного бассейнов, а также почвы.

Примагистральные территории подвергаются сильному воздействию (поглощают вредные выбросы от автотранспорта) и в свою очередь являются вторичным источником загрязнения окружающей среды. Вредные вещества при эксплуатации автотранспорта попадают в почву с выхлопными газами, испарениями из топливных систем, а также во время ремонта или заправки автомобиля горюче-смазочными материалами. Кроме того, отработавшие газы автотранспорта содержат токсичную пыль, частицы которой адсорбируют все наиболее опасные химические вещества. В сухую погоду при ветропереносе и механических воздействиях в атмосферу в виде пыли поступают наиболее легкие и тонкодисперсные фрагменты поверхностных загрязнений достаточно сложного состава и оседают в примагистральной территории.

Загрязнения примагистральной территории транспортными выбросами и загрязнениями поверхности проезжей части накапливаются постепенно, в зависимости от интенсивности транспортного потока, проезжающего по магистрали, и сохраняются очень долго даже после ликвидации дорожного полотна, воздействуя на химический и физический состав почвы.

С целью выявления уровня загрязнения почвы от отработавших газов автотранспорта подробно исследовались примагистральные территории в Ворошиловском районе г. Волгограда по улицам, вблизи которых расположены детские дошкольные учреждения: Череповецкая, Елецкая, Огарева, Рабочее-Крестьянская (рис. 1).

В ходе работы были произведены натурные замеры, в результате которых определены интенсивность движения и состав автотранспортного потока, геометрические параметры проезжей части, а также зон повышенной концентрации загрязняющих веществ в почве. На основе полученных данных с помощью методики, разработанной профессором В. Ф. Сидоренко, была определена загазованность прилегающих территорий [1].

где  $C_0$  — начальная концентрация оксида углерода на бордюре проезжей части,  $\text{мг/м}^3$ ;  $K_1$  — коэффициент, учитывающий снижение концентрации оксида углерода вследствие нормирования состава выхлопных газов и улучшения технического состояния автомобилей;  $K_2$  — коэффициент, учитывающий снижение концентрации оксида углерода в результате применения нейтрализаторов и газового топлива;  $K_3$  — коэффициент, учитывающий снижение концентрации оксида углерода после внедрения малотоксичных рабочих процессов и конструктивных улучшений двигателя;  $K_4$  — коэффициент, учитывающий рассеивание выхлопных газов между перекрестками;  $V$  — скорость ветра на улице,  $\text{м/с}$ ;  $H$  — ширина улицы в линиях регулирования застройки,  $\text{м}$ .

$$C_o = \frac{(7,38 + 0,026N)(100 + \sum A)}{100}, \quad (2)$$

204

$$\sum A = A_1 + A_2 + A_3, \quad (3)$$

где  $A_1$  — изменение количества автобусов и грузового транспорта в общем потоке от принятых 70 % на каждые 10 %  $\pm 4,6$  %;  $A_2$  — изменение средневзвешенной скорости движения от принятой 40 км/ч;  $A_3$  — изменение продольного уклона дороги от принятого нулевого на первые 2 %  $+1,5$  %, на каждый последующий 1 %  $+3$  %.

Полученные результаты приведены на рис. 2.



Рис. 2. Уровень загазованности примагистральных территорий на исследуемых участках: участки 1, 2 — ул. Огарева; участки 3, 4 — ул. Елецкая; участок 5 — ул. Рабоче-Крестьянская; участки 6, 7, 8 — ул. Череповецкая

Таким образом, на исследуемой УДС зафиксировано превышение концентрации оксида углерода: на ул. Череповецкой, Рабоче-Крестьянской в 4 раза, на ул. Огарева в 1,5 раза, на ул. Елецкой в 2 раза.

При удалении от источника загрязнения концентрация резко падает. На первые 30 м она снижается на 60 % от первоначального значения, т. е. на каждые 10 м на 20 %, а дальше наблюдается незначительные значения (на каждые 10 м — 1...2 %). Полученные результаты представлены в табл.

Уровень загазованности с учетом удаления от источника загрязнения

| Наименование участка | Наименование исследуемой улицы | Удаленность от проезжей части, м | Концентрация оксида углерода $C_{\text{ЛЗ}}$ , мг/м <sup>3</sup> |
|----------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| А                    | ул. Огарева                    | 136                              | 7,7                                                              |
| Б                    | ул. Огарева                    | 100                              | 2,5                                                              |
| В                    | ул. Огарева                    | 86                               | 3,59                                                             |
| Г                    | ул. Огарева                    | 324                              | 2,6                                                              |
| Д                    | ул. Елецкая                    | 147                              | 5,77                                                             |
| Е                    | ул. Елецкая                    | 152                              | 5,73                                                             |
| Ж                    | ул. Елецкая                    | 148                              | 5,72                                                             |
| К                    | ул. Елецкая                    | 134                              | 5,78                                                             |

По результатам расчетов зафиксировано, что норма 5 мг/м<sup>3</sup> превышает на участках А, Д, Е, Ж, К. В связи с этим требуется уделять особое внимание территориям детских дошкольных учреждений, так как там находится категория населения, наиболее подверженная негативному воздействию от вредных факторов.

При изучении пыли на том же участке улично-дорожной сети в г. Волгограде было выявлено следующее. Пыль на поверхности дорожного покрытия формируется из нескольких составляющих: частиц износа дорожной одежды, частиц автошин и деталей автомобиля. Ее состав, более 30 %, формируют мелкие частицы размером менее 100 мкм, которые свободно переносятся воздушными потоками в придорожную полосу и там оседают [2].

Частицы пыли адсорбируют все наиболее опасные химические вещества такие как: никель, кобальт, хром, цинк, медь и кадмий, которые обладают способностью накапливаться в пищевых цепях живых организмов.

Так как при значительной силе ветра крупнодисперсная пыль может переноситься на несколько километров, а мелко- и среднедисперсная — до нескольких десятков километров, в связи с этим в данной работе предусмотрено определение дисперсного состава пыли на исследуемом участке улично-дорожной сети [3].

С целью снижения уровня загрязнения городских почв от автотранспорта необходимо проводить следующие защитные мероприятия:

- улучшение качества дорожного покрытия;
- регулярная уборка проезжей части;
- благоустройство примагистральных территорий и их озеленение;
- устройство экранирующих сооружений;
- рекультивация почв примагистральных территорий.

Для достижения наибольшего эффекта, по возможности, данные защитные мероприятия необходимо проводить в комплексе.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сидоренко В. Ф.* Теоретические и методологические основы экологического строительства. Волгоград : Изд-во ВолгГАСА, 2000. 200 с.
2. *Сапожкова Н. В.* Разработка метода комплексной оценки воздействия автотранспорта на экологическую безопасность городской среды для обоснования мониторинга и защитных мероприятий : дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2012. 183 с.
3. *Сидоренко В. Ф., Сапожкова Н. В.* Изучение загазованности и запыленности от автотранспорта на улицах города Волгограда // Устойчивое развитие городов и территорий: проблемы, пути решения, инновации : сб. ст. по материалам Международной науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию создания Воронеж. гос. архит.-строит. ун-та. Воронеж : Воронеж. гос. архит.-строит. ун-т, 2011. С. 166—171.
1. *Sidorenko V. F.* Teoreticheskie i metodologicheskie osnovy ekologicheskogo stroitel'stva. Volgograd : Izd-vo VolgGASA, 2000. 200 s.
2. *Sapozhkova N. V.* Razrabotka metoda kompleksnoy otsenki vozdeystviya avtotransporta na ekologicheskuyu bezopasnost' gorodskoy sredy dlya obosnovaniya monitoringa i zashchitnykh meropriyatiy : dis. ... kand. tekhn. nauk. Volgograd, 2012. 183 s.
3. *Sidorenko V. F., Sapozhkova N. V.* Izuchenie zagazovannosti i zapylennosti ot avtotransporta na ulitsakh goroda Volgograda // Ustoychivoe razvitie gorodov i territoriy: problemy, puti resheniya, innovatsii : sb. st. po materialam Mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf., posvyashch. 80-letiyu sozdaniya Voronezh. gos. arkhит.-stroit. un-ta. Voronezh : Voronezh. gos. arkhит.-stroit. un-t, 2011. S. 166—171.

© Сидоренко В. Ф., Сапожкова Н. В., Чеснокова А. Н., 2014

Поступила в редакцию  
в декабре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

*Сидоренко В. Ф., Сапожкова Н. В., Чеснокова А. Н.* Исследование загрязнения автотранспортом воздушной среды и почв вблизи дошкольных учреждений // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 203—206.

УДК 628.511.12

**С. А. Чебанова, В. Н. Азаров, Н. А. Маринин, В. И. Воробьев**

## **ОБ ИССЛЕДОВАНИИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЫЛИ ЗОЛЫ В ВОЗДУХЕ ГОРОДОВ**

Определены аэродинамические свойства частиц пыли золы, образующихся в результате сгорания твердого топлива (угля) котельной, методом пофракционного оседания. Произведен анализ ее дисперсного состава, построена зависимость скорости оседания от эквивалентного диаметра частицы пыли в вероятностно-логарифмической сетке

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** аэродинамические свойства частиц пыли, зола твердого топлива, метод пофракционного оседания, анализ дисперсного состава, эквивалентный диаметр частиц пыли, скорость оседания.

The aerodynamic properties of the ash dust particles, which appear as the result of combustion of solid fuel (coal) boiler by the method of factional subsidence, is determined. The analysis of its size-consist is carried out. The authors show the dependence of the sedimentation rate on the equivalent diameter of the dust particles in the probability-logarithmic grid.

**К е y w o r d s:** aerodynamic properties of dust particles, solid fuel ash, factional sedimentation method, analysis of size-consist, equivalent diameter of dust particles, sedimentation rate.

Для оценки закономерности рассеивания в атмосфере городов пыли от золоотвалов и выбросов предприятий теплоэнергетики, работающих на твердом топливе, важно знать аэродинамические характеристики и дисперсный состав пыли. Поэтому задачей данного исследования было определение экспериментально методом пофракционного оседания с последующим анализом ее дисперсного состава и построением зависимостей скорости оседания от эквивалентного диаметра частицы пыли.

При пофракционном (дробном) оседании анализируемая проба измельченного материала диспергируется в верхней части столба дисперсионной среды [1]. Из верхнего слоя этой среды в первую очередь выпадают фракции наиболее тяжелых и крупных частиц, которые оседают на дне седиментационного цилиндра, пройдя к определенному времени высоту столба.

Скорость оседания пыли определили методом седиментометрии в воздушной среде, в качестве прибора использовался воздушный седиментометр [2, 3]. На лист фильтровальной бумаги рассыпали исследуемую пыль весом 50 мг, резким воздушным толчком распылили в специальном распыливающем устройстве, из которого облачко пыли попало в верхнюю часть седиментационного цилиндра ( $H = 1140$  мм), где под действием силы тяжести частицы оседают в неподвижном воздухе. Частички пыли оседают на липкой ленте, расположенной на ленточном транспортере с различной скоростью оседания. Перемещается лента транспортера скачкообразно на величину диаметра седиментационного цилиндра ( $d = 160$  мм) за равные промежутки времени ( $t = 2$  с).

Следующий этап экспериментальной части — дисперсный анализ состава пыли золы для каждого из участков ленты. Исследование осуществлялось методом микроскопии [4, 5]. На отобранных участках ленты фотографировались частицы, увеличенные под микроскопом в 200...1000 раз, закрепленные

на предметном стекле, с последующей обработкой фотографий при помощи графического редактора (рис. 1, 2). Шкала на рис. 1, 2 представлена в мм (деление 0,1 мм = 100 мкм; 0,05 мм = 50 мкм; 0,01 мм = 10 мкм).

Подсчет количества частиц на каждом снимке и построение интегральных кривых в вероятностно-логарифмической сетке выполнялись в программе, входящей в перечень Минприроды.

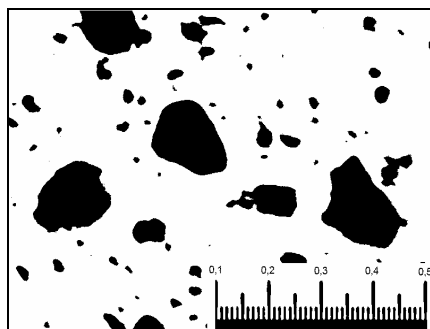


Рис. 1. Частицы пыли, осевшие на 1-й с

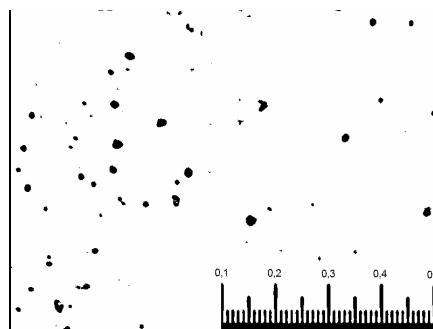


Рис. 2. Частички пыли, осевшие на 12-й и 13-й с

В результате проведенных исследований установлено, что крупность оседающих на ленту частиц в течение времени уменьшается (рис. 3). Так медианный диаметр анализируемой на ленте пыли, составил: через 1 с — 120 мкм; через 3 с — 100 мкм; через 5 с — 70 мкм; через 7 с — 18 мкм; через 9 с — 14 мкм; через 11 с — 11 мкм; через 13 с — 7 мкм. Поэтому кривая 1 описывает частицы, оседающие со скоростью более 1,14 м/с, кривая 2 — 0,38...1,14; кривая 3 — 0,22...0,38; кривая 4 — 0,16...0,22; кривая 5 — 0,13...0,16; кривая 6 — 0,10...0,13; кривая 7 — 0,08...0,10; кривая 8 — менее 0,08.

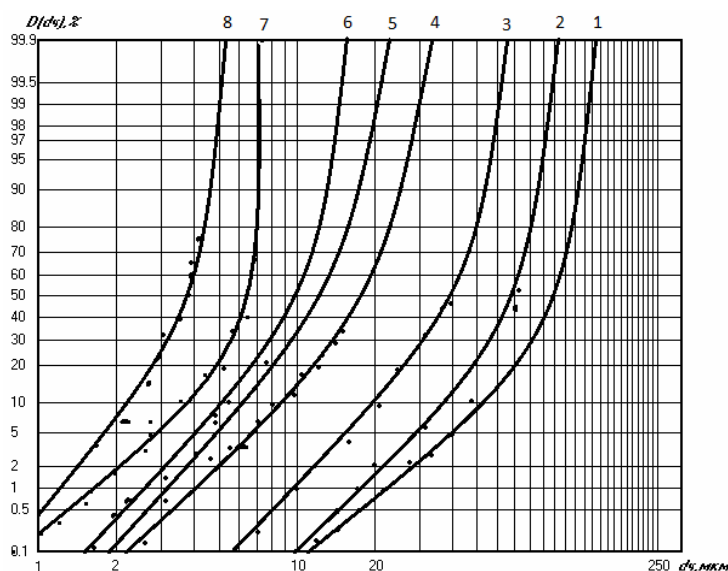


Рис. 3. Интегральные кривые массы частиц золы, выделяющейся при сжигании твердого топлива, по диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке: 1 — для пылеоседания через 1 с; 2 — через 3 с; 3 — через 5 с; 4 — через 7 с; 5 — через 9 с; 6 — через 11 с; 7 — через 13 с



По результатам проведенного дисперсного анализа построены зависимости скорости оседания от эквивалентного диаметра частицы в вероятностно-логарифмической сетке (рис. 4).

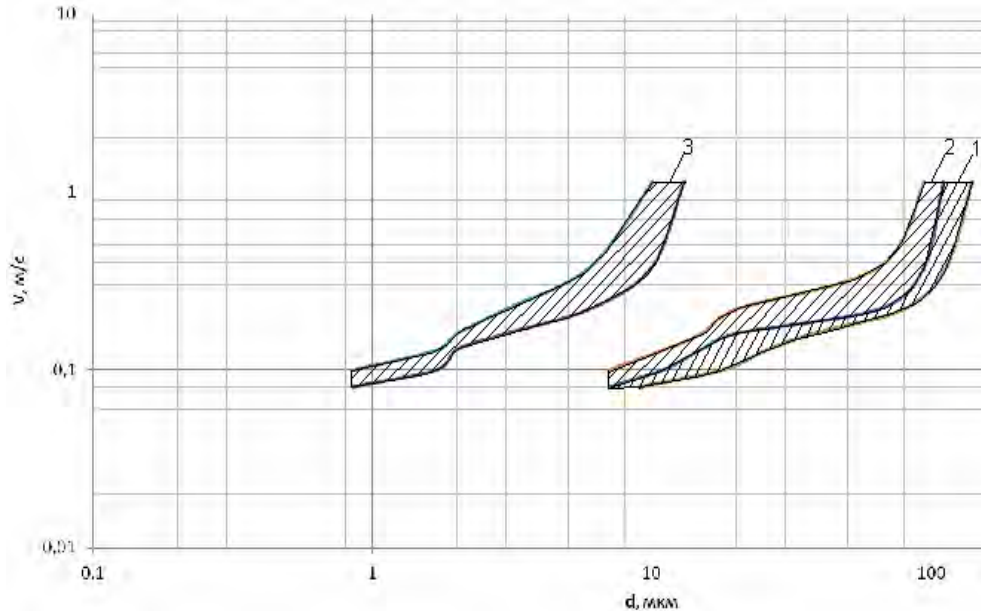


Рис. 4. Диапазон изменений зависимости скорости оседания от эквивалентного диаметра частицы в логарифмической сетке: 1 — максимальные эквивалентные диаметры; 2 — медианные эквивалентные диаметры; 3 — минимальные эквивалентные диаметры

Зависимость скорости оседания от эквивалентного диаметра частицы в логарифмической сетке (см. рис. 4) и полулогарифмической сетке (рис. 5) позволили сделать вывод о том, что при скорости 1,14 м/с частицы имеют максимальный размер 140 мкм, медианный размер 120 мкм и минимальный размер 11,3 мкм. При скорости 0,22 м/с частицы имеют максимальный размер 65 мкм, медианный размер 47 мкм и минимальный размер 5,1 мкм. При скорости 0,08 м/с частицы имеют максимальный размер 7,1 мкм, медианный размер 6,3 мкм и минимальный размер 0,2 мкм. Таким образом, в результате эксперимента установлено, что на первых секундах выпадает наибольшее количество частиц пыли как по числу, так и по массе.

Анализ экспериментальных данных и представлений стохастической зависимости скорости оседания в обычной (рис. 6), полулогарифмической (см. рис. 5) и двойной логарифмической (см. рис. 4) сетках показывает, что наиболее близка для определения скорости оседания следующая формула:

$$V = A \exp(bd), \quad (1)$$

где  $V$  — скорость оседания, м/с;  $A$ ,  $b$  — экспериментальные коэффициенты;  $d$  — эквивалентный диаметр, мкм.

Представленная формула показывает высокую степень сходимости в пределах от 10 до 110 мкм. В первом приближении она может быть применима для расчетов, например, в экологических проектах.

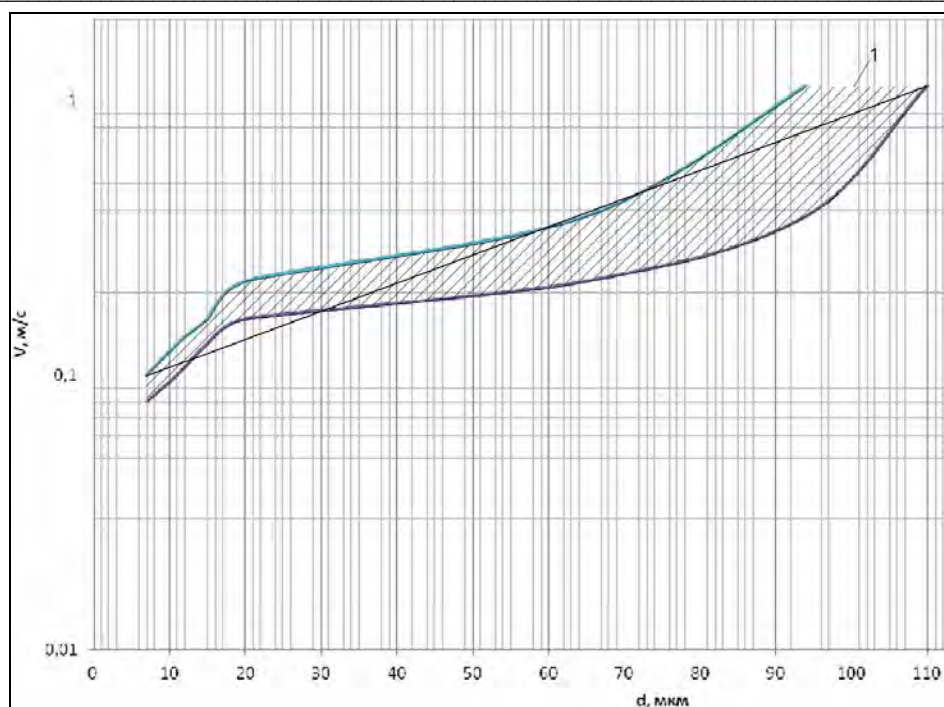


Рис. 5. Диапазон значений скорости оседания в зависимости от эквивалентного диаметра частицы в полулогарифмической сетке: 1 — медианные эквивалентные диаметры

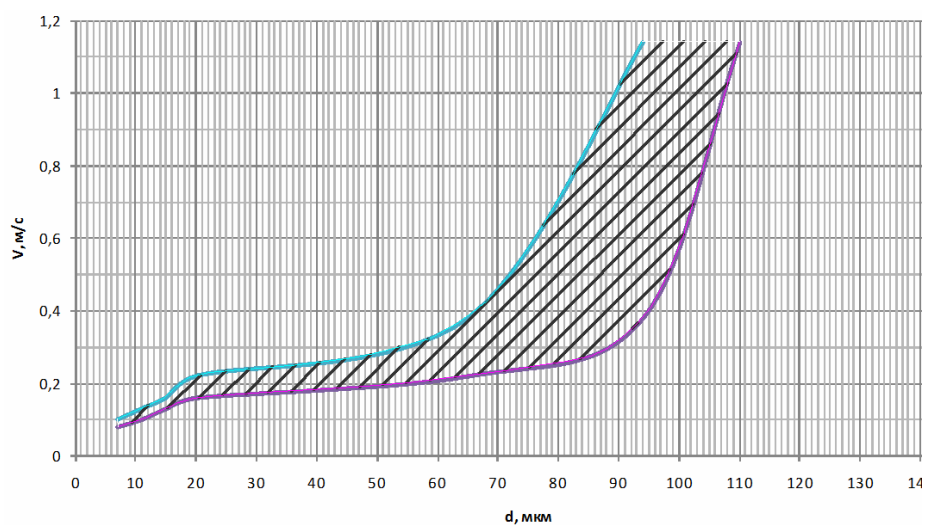


Рис. 6. Диапазон значений скорости оседания в зависимости от эквивалентного диаметра частицы в обычной сетке — медианные эквивалентные диаметры

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Медников Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М. : Наука, 1981.
2. Об исследовании аэродинамических характеристик асбестоцементной пыли в выбросах в атмосферу / В. Н. Азаров, О. В. Бурлаченко, Р. А. Бурханова, Н. А. Маринин // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. 2012. № 1 (20). С. 17.

3. Азаров В. Н., Маринин Н. А., Жоголева Д. В. Об оценке концентрации мелкодисперсной пыли (PM10 и PM2,5) в атмосфере городов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 5—2. С. 144—148.

4. Азаров В. Н., Сергина Н. М. Методика микроскопического анализа дисперсного состава пыли с применением ПК. Волгоград, 2002. 9 с.

5. Азаров В. Н., Бессараб О. И., Кабаев О. В. Теоретические исследования скорости оседания мелкодисперсной пыли в воздушной среде рабочих помещений предприятий машиностроения и стройиндустрии // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архит. 2010. № 17. С. 102—105.

1. Mednikov E. P. Turbulentnyy perenos i osazhdenie aerorozley. M. : Nauka, 1981.

2. Ob issledovanii aerodinamicheskikh kharakteristik asbestotsementnoy pyli v vybrosakh v atmosferu / V. N. Azarov, O. V. Burlachenko, R. A. Burkhanova, N. A. Marinin // Internet-Vestnik VolgGASU. 2012. № 1 (20). S. 17.

3. Azarov V. N., Marinin N. A., Zhogoleva D. V. Ob otsenke kontsentratsii melkodispersnoy pyli (RM10 i RM2,5) v atmosfere gorodov // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2011. № 5—2. S. 144—148.

4. Azarov V. N., Sergina N. M. Metodika mikroskopicheskogo analiza dispersnogo sostava pyli s primeneniem PK. Volgograd, 2002. 9 s.

5. Azarov V. N., Bessarab O. I., Kabaev O. V. Teoreticheskie issledovaniya skorosti osedaniya melkodispersnoy pyli v vozduшной среде rabochikh pomeshcheniy predpriyatiy mashinostroeniya i stroyindustrii // Vestnik VolgGASU. Ser.: Str-vo i arkh. 2010. № 17. S. 102—105.

© Чебанова С. А., Азаров В. Н., Маринин Н. А., Воробьев В. И., 2014

Поступила в редакцию  
в ноябре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Об исследовании аэродинамических характеристик пыли золы в воздухе городов / С. А. Чебанова, В. Н. Азаров, Н. А. Маринин, В. И. Воробьев // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 207—211.

## **ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. ТЕОРИЯ РАЗВИТИЯ ГОРОДА**

УДК 332.1:711.4

**Н. Г. Юшкова**

### **ТЕРРИТОРИАЛЬНО-ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ПОЛИТИКА РАЗВИТИЯ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ РЕГИОНОВ: РЕТРОСПЕКТИВА ЗАКОНОДАТЕЛЬНЫХ ОСНОВ**

Исследована эволюция формирования организационно-правового императива на основе систематизации методологических положений законодательной системы на примере Великобритании. Определены его особенности и закономерности. Раскрыта модификации предмета и объекта территориально-пространственной политики развития градостроительных систем регионов и установлены ее причины. Отмечено выраженное изменение характера взаимодействия социально-экономических и градостроительных принципов.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** территориально-пространственные процессы, система, управление, регион, политика, развитие, документация.

The evolution of the formation of organizational and legal imperative on the basis of systematization of methodological provisions of legislative system on the example of Great Britain is investigated. Its features and regularities are defined. The modifications of the subject and object of territorial and spatial policy of the development of town-planning systems for the regions are found and its reasons are determined. The intense change of the nature of interaction between social and economic and town-planning principles is noted.

**K e y w o r d s:** territorial and spatial processes, system, management, region, policy, development, documentation.

Одним из основных вопросов региональной политики является взаимосвязь социально-экономических преобразований в обществе и процессов развития градостроительных систем (пространственных и непространственных факторов). Принято считать, что старт современной ее фазы был положен в Великобритании, индустриализация в которой происходила опережающими темпами по сравнению с другими странами Европы и мира.

Первый этап — зарождение — современной региональной политики в этой стране приходится на годы, последовавшие за промышленной революцией (1700—1780 гг.) и предшествующие Второй мировой войне. Ускоренное развитие отдельных отраслей производства вызвало характерные территориально-пространственные изменения в сложившемся землепользовании в основном в крупных и крупнейших городах, но отразилось и на системах расселения населения в целом. Новые типы производств первоначально размещались преимущественно в пригородах, а значительно позже, в начале XX века, и в самих городах. В частности, в Лондоне, как следствие процессов освоения новых территорий пригородов, городское население начало перемещаться за пределы столицы [1, 2]. Одновременно с этим увеличивалось количество

городов, образованных на основе небольших населенных пунктов, население в которых прирастало огромными темпами, так называемый феномен разрастания городов (по П. Холлу). Сложившиеся условия ограничивали возможности перспективного развития территорий и планирования этих процессов.

Вместе с тем в Великобритании существовали устойчивые национальные традиции регулирования градостроительства, что в целом обеспечивало поступательность и эволюционность территориально-пространственной политики. В частности, английский градостроительный закон 1909 года «увенчал собой систему европейских законодательных актов, введенных в действие, начиная с 40-х годов XIX века» [1, с. 179—182]. Согласно этому закону составление генеральных планов... ставилось под контроль Министерства внутренних дел... Законом был установлен порядок оценки земли и приняты меры против спекуляции земельными участками... Для реализации проектов планировки городам разрешалось выпускать займы на срок до 80 лет. Таким образом, закон 1909 года подвел под градостроительство... экономическую и правовую платформу. Уже через 1,5—2 года после опубликования закона в Англии велись работы над составлением генеральных планов 40 городов...» [3, с. 18].

Позднее, в конце 1920-х—начала 1930-х годов, экономическая депрессия, затронувшая, прежде всего, «индустриальные», ключевые, экспортные отрасли, такие как угольная, металлургическая и судостроительная, и приведшая к значительному сокращению объемов производства, усилила эту тенденцию. Возможности занятости городского населения в этих традиционных сферах ограничивались, но одновременно с этим повышалось благосостояние бывших рабочих, многие из которых пополнили формирующийся так называемый средний класс, что обозначало новые, проблемные, формы проявления различий регионов в уровне безработицы.

Предпринятое британским правительством решение в 1928 году о создании Управления по перемещению промышленности рассматривалось как наиболее очевидный способ решения проблемы нарушения действовавшей до этого времени схемы, привязывающей к единой территории процессы, предназначенные и для проживания рабочих, и для обеспечения их трудовой занятости [4]. Этот орган был призван выполнять функции управления территориями в рамках реализуемой в Великобритании региональной политики. На практике эта инициатива не показала высокой эффективности. С начала применения схем перемещения лишь незначительное количество участников этой программы получили финансовые компенсации, связанные с переездом на новые, более благополучные, территории. Отсутствие гарантий предоставления работы нуждающимся в ней на новом месте проживания, вследствие повсеместного распространения безработицы, повышало риски для участников программы. И, наконец, ее потенциальными участниками становилась молодежь как наиболее образованная, предприимчивая, динамичная и мобильная часть населения, с которой в основном были связаны надежды по стабилизации положения в проблемных регионах, — местах их недавнего постоянного проживания. Таким образом, изменение схемы пространственного размещения рабочих без использования дополнительных, адекватных ситуации, инструментов не открывало новых векторов роста регионов, имеющих низкие показатели социально-экономического развития.

В результате создания Управления по перемещению промышленности и некоторых других действий правительственного уровня, предпринятых в эти годы, поставленные первоначально задачи по оптимизации процессов обеспечения трудовой занятости населения не были достигнуты. Несмотря на это, как позитивные, так и негативные последствия реализации проводимой политики регионального развития в Великобритании заложили ее структурную основу, а необходимость активного участия правительства в решении региональных проблем стала ее неотъемлемым признаком.

Постоянное ухудшение в эти годы состояния экономических систем многих стран мира, наряду с Великобританией, привело к признанию правительством высокой общественной значимости проблем регионального развития. Они решались в поручениях по разработке отдельных крупномасштабных научных работ, связанных с изучением проблемных территорий, по результатам которых были опубликованы «Доклады об исследовании состояния промышленности в некоторых депрессивных районах» и принят Закон о специальных районах (Special Areas Act) (1934 г.) [4, 5]. В этом законе был внедрен принцип региональной политики «приближения работы к рабочим» и определены объекты первоочередного внимания национальных органов. Так, были выделены регионы: Южный Уэльс, Северо-Восточная Англия, Северо-Западная Англия (Западный Камберленд), а также Центральная Шотландия. Вместе с тем методические основы выделения специальных районов не были лишены недостатков и критиковались многими специалистами. Оказалось, что при формировании перечня таких районов не были учтены и регионы Великобритании, испытывающие проблемы развития, и некоторые города (например, Глазго, Ньюкасл), расположенные на территории таких кризисных районов и находящихся под влиянием этих явлений. Кроме того, учрежденные, в соответствии с данным законом, для проведения региональной политики комиссары (в Шотландии, Англии и Уэльсе) были ограничены в своих полномочиях как в организационно-административных, так и в финансовых аспектах, что не способствовало качественным сдвигам в этой сфере.

С целью устранения этих очевидных недостатков в последующие годы был расширен арсенал инструментов, используемых в специальных районах. В частности, в 1936 году стала использоваться практика подготовки территорий для промышленного освоения (создания промышленных зон), были введены займы для малого бизнеса. С момента принятия в 1937 году Закона о специальных районах с поправками (Special Areas Act (Amendments)) расширились полномочия комиссаров в отношении использования в депрессивных регионах практики преимущественного размещения правительственных контрактов, установления налоговых стимулов, расширения возможностей Казначейства Великобритании по предоставлению кредитов большим компаниям [6].

Региональная политика в Великобритании на этом этапе ее развития, в частности функционирование специальных районов, согласно анализу таких исследователей, как Х. Армстронг, Дж. Харви и многих других, показала низкую эффективность практики применения этого нового типа пространственной формы развития региональных систем [4]. Но сам факт того, что еще в 1934—1939 годах в Великобритании специальные районы впервые были обозначены как приоритетные объекты региональной политики, а займы, налоговые стимулы, строительство государственных предприятий, подготовка

территорий для промышленного освоения и льготные правительственные контракты — как ее инструменты, свидетельствовал о инновационности управленческих подходов к развитию региональных систем, которые после Второй мировой войны стали активно применяться во всех странах мира.

Проблема диспропорционального развития районов, становящаяся все более актуальной, требовала комплексного решения, и ей был придан государственный статус. Как результат этого была образована Королевская комиссия по распределению населения, занятого в промышленности (Royal Commission on the Distribution of the Industrial Population), так называемая комиссия Барлоу (1937 г.). На нее были возложены задачи исследования причин, влияющих на пространственную географию расселения населения Великобритании, занятого в промышленности, обоснования вероятных тенденций этих процессов в будущем, определения возможных последствий социального, экономического или стратегического характера от концентрации в больших городах и отдельных районах страны новых отраслей промышленности (или промышленного населения), а также подготовка специальных итоговых аналитических отчетов (докладов) о корректирующих это состояние мерах, предпринимаемых в национальных интересах [7, 8].

Отчет этой комиссии, известный также как «Доклад Барлоу», подготовленный в августе 1939 года и опубликованный в январе 1940 года, оценивался аналитиками как документ, опередивший свое время. К моменту его составления неуправляемость процесса роста городов стала очевидным фактом. Несмотря на то, что в стране уже действовали законы, в разные годы принятые парламентом (1909, 1925, 1935) и обязывающие власти обеспечивать разработку документов планирования, они не гарантировали эффективный контроль его исполнения.

Неравномерность социально-экономического развития районов выражалась в наличии его диспропорций: поляризации нормально функционирующих, благодаря наличию современных градообразующих предприятий, регионов и значительно отстающих в своем развитии от них регионов, с преобладанием в них предприятий машино- и кораблестроения, обработки хлопка, добычи и переработки угля, чугуна и стали.

«Новая индустрия» — деятельность, олицетворяющая идеологию XX века и реализующая зарождающиеся технологии (электромашиностроение, автомобилестроение, авиастроение, точное машиностроение, химическая и цементная промышленность, фармацевтика, производство продуктов питания), — стала одним из значимых факторов освоения и развития отдельных районов, вызвавшая бурное развитие непроизводственной сферы. Предприятия, обеспечивающие эти процессы (деловые здания, учреждения обслуживания), располагались, как правило, ближе к центральной части города. Наметились центробежные тенденции. За период с 1914 по 1939 гг. население Лондона увеличилось с 6,5 до 8,5 млн чел., а площадь застройки — в 3 раза [9]. Планировочные градостроительные преобразования формы города произошли к началу 1940 г. Лондон изменил щупальцеобразную форму и стал развиваться равномерно во всех направлениях. В большинстве своем эти процессы не были управляемыми и приобрели масштабы и значимость государственной проблемы. Назрела необходимость в разработке единой целенаправленной политики, позволяющей одновременно и решать возникающие противоречия, и противостоять им в будущем.

Востребованность экономической системой новых приоритетных отраслей производства объяснялась их высокой технологической способностью эффективно реализовывать природные, трудовые и финансовые ресурсы, а также значительным преобладанием доходов по отношению к затратам. Эти отрасли не приживались на территориях, испытывавших на себе депрессивные последствия упадка экономики. Значительный экономический эффект, полученный от результатов деятельности предприятий «новой индустрии», позволил привлечь дополнительные инвестиции на территории районов, что способствовало их дальнейшему развитию (экономическому и градостроительному). В то же время упадок других районов стал более очевидным.

С этого времени территории, подверженные депрессии, стали предметом особого внимания правительства. Оно направляло дополнительные инвестиции на подъем экономики этих районов. Но эти действия носили эпизодический характер, в них отсутствовали элементы системности.

Действовавшие законы не запрещали напрямую строительство даже в тех случаях, когда инициативы застройщиков явно противоречили общественным интересам. Неограниченная свобода собственников частного капитала, соответственно этому, диктовала формы развития территории, определяла степень допущений в градостроительстве. Последствия реализации «свободных» градостроительных решений, в основном отрицательных для больших городов (перенаселение, загрязнение окружающей среды и т. п.), требовали их нейтрализации и введения жестких управленческих методов в региональном градостроительстве. Отвечая на этот посыл, предлагалось рассредоточение промышленности и населения из Лондона и Бирмингема, что позволяло рационально перераспределить имеющиеся трудовые ресурсы и одновременно стабилизировать состояние депрессивных районов.

Деятельность комиссии не сводилась к простой констатации фактического состояния отраслей промышленности и характера тяготения к ним населения, она распространялась также и на оценку социальных последствий этих преобразований: состояние жилищного фонда, здравоохранения, транспортных сообщений с местами приложения труда, и на основании полученных данных обосновывала меры по урегулированию экономических и градостроительных диспропорций (определение степени управленческого вмешательства в процессы развития городских систем). Рекомендации доклада акцентировали внимание органов власти на необходимости введения мер жесткого контроля в вопросах регионального планирования, развития новых городов, образования промышленных зон и размещением бизнес-процессов. Они впоследствии были приняты всеми послевоенными правительствами Великобритании.

В конечном итоге результаты деятельности комиссии выразились в обосновании принципов планирования, разработке на их основе жизнеспособных моделей управления территориями, задающих стратегии региональной политики как жизненно важной сферы для национальных интересов страны, и в формировании общественного движения за ограничение роста городов, основанного на принципах планирования, большую часть сторонников которого составляли профессиональные планировщики.

Благодаря деятельности комиссии Барлоу в начале 1940-х годов, наряду с активной популяризацией идей против разрастания крупных городов, их аргументацией дисперсным размещением промышленности, постепенно



менялись представления о региональном планировании. Все проводимые до этого времени управленческие мероприятия, содержащие в себе элементы планирования, показали, что в зависимости от статуса объекта существует ощутимая разница в планировочной деятельности. Поскольку в большинстве случаев под объектом управления понимался город с прилегающими к нему территориями и лишь в некоторых случаях — несколько городов с окружающими их пригородами, соответственно, выделилось два самостоятельных объекта, за каждым из которых закрепился специфический термин: «городское и региональное планирование». Одновременно с этим конструировались принципы формирования системы экономического и градостроительного планирования, означавшего появление новых элементов британской плановой политики.

Вторая мировая война оказала противоречивое воздействие на развитие как британской экономики в целом, так и отдельных регионов страны, потребовав отвлечения в вооруженные силы более 5 млн чел. и вызвав быстрое развитие стратегически важных отраслей промышленности (угольной, судостроительной, металлургической), составлявших основу экономики депрессивных районов Великобритании. А возросшие потребности на товары и услуги способствовали рассредоточению населения из крупных городов центральных графств Англии. Все это определенным образом ослабило проблему безработицы.

Сразу после окончания войны, с приходом к власти лейбористского правительства, задачи проведения активной региональной политики были возложены на Министерство торговли, унаследовавшего от комиссаров по специальным районам такие функции, как строительство в районах развития предприятий, предоставление кредитов для создания промышленных зон, оказания помощи в восстановлении заброшенных земель [4, 7, 10, 11]. Действовавший, начиная с 1945 года, закон о размещении промышленности (Distribution of Industry Act 1945) обеспечивал всесторонний правительственный контроль над территориальным размещением предприятий различного профиля. Закон имел выраженную регулирующую направленность: он ограничивал промышленность на всей территории страны посредством введения специальных регламентов и одновременно стимулировал ее появление в районах, требующих принудительного развития, — «районах развития» (development areas), в отличие от бывших специальных районов. В новый перечень районов развития были включены города Глазго, Данди, Кардифф, Суонси, Ньюкасл, и в последующие годы он неоднократно дополнялся. Сохранялись такие используемые инструменты контроля над пространственной экспансией промышленности из процветающих регионов, полученные в наследство от военного времени, в частности система строительных лицензий.

Государственный уровень решения проблем диспропорционального развития районов вызвал экстренную выработку комплекса мер, имевших серьезное экономическое обоснование и финансовую поддержку. Среди них выделялись стимулирующие предложения, позволяющие привлечь для расширения процессов градостроительного освоения этих территорий наибольшее число промышленников: были определены различные правительственные привилегии, гарантии последующего предоставления объектов недвижимости для их приспособления в качестве промышленных объектов, определение

благоприятного инвестиционно-налогового климата, предоставление государственных субсидий и льгот. Однако в центре внимания закона о размещении промышленности было ограничение набора предприятий производственного профиля, в то время как непроизводственные функции не испытывали на себе характерных регулирующих воздействий. По сути, этот процесс их повсеместного неуправляемого размещения вылился в характерную тенденцию времени. Но в середине 40-х годов XX века невозможно было получить объективных данных о перспективах развития этого сектора экономики и прогнозировать степень его влияния на градостроительное освоение территорий, а также то, что через 70 лет, в наши дни, он практически вытеснит традиционный производственный сектор [12, с. 153].

Принципы, обозначенные в законе 1945 года, получили впоследствии развитие в одноименных законах 1950, 1958, 1960 годов, а также дали толчок к инициированию и разработке правительством Великобритании, а точнее, Министерством городского и национального планирования, созданным в 1943 году, новых законодательных актов: закона о новых городах (1946 г.) и закона о новом развитии (1952 г.).

Закон о новых городах (New Towns Act) ознаменовал начало революционных преобразований в территориально-пространственной политике Европы XX века, — децентрализации процессов развития. Они были связаны с приданием государственного статуса проблеме регулирования роста метрополий, эффективным средством решения которой было создание новых городов (поселений). Его принятие означало начало практической реализации политики в Англии [8, 13].

Великобритания, в этом смысле, имела максимальные предпосылки для реализации принципов создания сети новых городов. Предшествующие этапы развития градостроительных систем на территории страны испытали в наиболее выраженных формах последствия и проявления проблем, «впитали» в себя уникальный, пусть и теоретический, опыт проектирования идеальных городов-садов Э. Говарда, а также отдельные примеры его реализации (города Летчуорт, возникший в начале века, и Уэйлин — между двумя мировыми войнами). Кроме того, большинство членов нового парламента страны были лейбористами, стремящимися повысить свою политическую популярность на идеях «социализации» населения, качественного улучшения жизни и принципиально новых средовых форм ее организации.

Необходимость реализации нового направления национальной региональной политики и общая ее направленность были зафиксированы в законе 1946 года о строительстве за счет государства «новых городов», которые должны были обладать, в отличие от большинства известных урбанистических новообразований, своей собственной промышленностью (местами приложения труда) и завершенной полноценной системой общественного обслуживания [13, с. 87]. А основные характеристики новых городов были определены созданным в этом же году Национальным комитетом по новым городам (New Towns Committee) под председательством лорда Рейта. Появление комиссии преследовало главным образом цели разработки «общих проблем создания новых городов, освоения территории, их организации и административной структуры в рамках запланированной децентрализации перенаселенных городских зон» [8, с. 67].

В своей основе комплекс мероприятий по созданию новых городов преследовал, прежде всего, достижение конкретных экономических результатов. Прогнозы показывали, что новые города были очень привлекательными объектами для инвестирования собственниками капитала, поскольку их образование в широких масштабах открывало возможности появления огромного количества недвижимости различного функционального назначения. При этом каждый объект недвижимости потенциально становился объектом собственности, и при получении прав собственности на недвижимое имущество частные инвесторы были готовы финансировать новое строительство других объектов. Кроме того, новые города по целому ряду качеств значительно превосходили исторически сложившиеся города, формировавшиеся в течение нескольких столетий и накопившие много проблем, связанных с особенностями пространственной организации территории, транспортного обеспечения, экологии среды. В этих городах стала не возможна бесконечная свобода выбора участков под застройку: каждый раз приходилось сталкиваться с огромным числом ограничений. В отличие от исторического, новый город на первый взгляд был лишен подобных проблем. Эти преимущества и создавали конкурентоспособность новым городам.

Все это формировало у правительства страны представление о широких возможностях новых городов, перспективах перехода большей части объектов после окончания их строительства в его собственность. В то же время все регулирующие и организационные мероприятия выполнялись корпорациями развития, ведущими работы, связанные с реализацией планов создания нового города. Создание новых городов — цель государственной политики плановости процессов расселения населения за пределами крупных городов и расширения существующих населенных пунктов аграрной специализации.

Рейт предусматривал поэтапную закладку 14 новых городов с населением около 600 тыс. чел в основном вокруг крупных, переуплотненных агломераций с целью обеспечения рационального расселения населения. Восемь из них образовывали так называемый Лондонский круг и находились в 30...50 км от Лондона: Базилдон, Харлоу, Стивенедж, Уэллин, Хатфилд, Хемел Хемстид, Брекнел, Кроули; два — на северо-востоке Англии; два — в Центральной Шотландии (Глазго — Эдинбург); один — около Кардиффа и единственный Корби находился на отдаленном расстоянии от больших городов. Величина городов планировалась прямо пропорционально количеству населения, нормировались количество и способы сочетания функциональных зон города, ранжировались плотность населения и плотность застройки в каждой из этих зон.

В соответствии с рекомендациями комиссии Рейна в каждом новом городе была создана Корпорация развития, назначаемая Министерством градостроительства после консультации с местными муниципалитетами, курирующими правовые, организационные, технические и экономические вопросы реализации проектов новых городов. Обширный круг вопросов, охватывающий деятельность корпораций, касался урегулирования интересов собственников и пользователей земельных участков, посредством ведения переговоров и получения согласованных юридических решений, необходимых для строительства новых городов.

Следствием понимания важности обеспечения принципа системности в решении вопросов о городском и сельском планировании стало принятие в 1947 году соответствующего закона, ставшего следующим этапом в развитии системы планирования, благодаря внедрению новых принципов, оказавших существенное влияние на создание плановых систем в других странах (Будущее планировки (исследование центра по изучению окружающей среды). М., 1976) [14, 15].

Первый принцип заключался в национализации прав на использование земель и в предоставлении существенных социальных гарантий при реализации разного рода градостроительных преобразований. В то же время закон не давал государству преференций в вопросах изъятия и резервирования земельных участков для реализации его функций. Исключения составляли особые случаи принудительной покупки земель для обеспечения защиты общественных интересов. Необходимость стимулирования развития рынка недвижимости делала несостоятельным и преждевременным введение ограничительных мер. А увеличение оборота на рынке было сопряжено в основном с интенсификацией процессов совершения сделок купли-продажи земельных участков. Принятие этих решений позволяло обеспечить эффективный контроль над развитием и использованием земли в соответствии с утвержденными планами.

Второй принцип был связан с повышением значимости комплексного управления градостроительным развитием территории, важности для этой системы методов планирования и регулирования, позволяющих стать ему (управлению) более гибким и маневренным. Благодаря принятию закона актуализировались вопросы, связанные с последующей реализацией положений планов развития территорий. Для этих целей предполагались новые местные органы планирования, у которых появилось право составления и пересмотра планов развития территорий каждые пять лет на основании различных исследований и их серьезного анализа как средства формирования аргументированных и объективных решений развития территорий.

Наряду с этим закон вводил сертификаты на промышленное строительство (СПС) (industrial development certificates) в качестве инструмента контроля и одновременно стимулятора размещения промышленности (в основном его обрабатывающего сегмента) в регионах с высокой безработицей. Этот закон способствовал решению проблемы перенаселения в крупных городах, создавая предпосылки для их комплексной реконструкции. В последующие годы, с учетом постоянного роста затрат на региональную политику, финансирование государством региональных инициатив постоянно сокращалось, строительство современных предприятий в районах развития сворачивалось, действие СПС ослаблялось.

В законе о городском и сельском планировании был также реализован принцип компенсаторных выплат владельцам земельных участков. Он предусматривал возможность получения землевладельцами определенной компенсации от местного планового органа в том случае, если его участок был необходим для реализации мероприятий, обозначенных в планах развития. Наличие этого принципа позволило рассматривать закон как инструмент, экономическими методами регулирующий отношения представителей власти и собственников недвижимости.

Несмотря на свою адекватность современным условиям, эти принципы не способствовали кардинальным изменениям в системе планирования, сохраняющей относительную стабильность, что и вызывало их противоречивость быстро распространяющимся процессам урбанизации. Для соответствия новым требованиям землепользования было необходимо создание двухуровневой системы планирования с разработкой структурных планов, охватывающих рассмотрение наиболее общих вопросов и предназначенных для больших по охвату территорий на первом уровне, и локальные планы, предназначенных для сравнительно меньших территорий, раскрывающих и детализирующих положения, обозначенные в структурных планах, на втором уровне [15].

Реализация положений закона 1947 года означала, что начатая реформа градостроительства в Великобритании приобрела конкретные пространственные формы. Застройка городов законодательно оформлялась на основе функционального зонирования, было официально признано районное (региональное) планирование, расширились масштабы планировочных задач и появились специальные разделы градостроительной документации (Будущее планировки (исследование центра по изучению окружающей среды). М., 1976). В этом законе впервые была обозначена проблема взаимосвязи и взаимовлияния процессов непространственного и пространственного планирования регионов. Поскольку до этого времени в перечень стандартных операций планировщиков входили достаточно узко направленные работы, то выдвинутые временем новые задачи социально-экономического развития территории требовали не только специального изучения, но и разработки принципов интеграции градостроительства в смежные с ним сферы деятельности.

Благодаря таким нововведениям система разработки, согласования и утверждения градостроительной документации изменилась кардинальным образом, а региональная политика получила новые приоритеты развития.

На эти годы приходится начало формирования второго, переходного (послевоенного), этапа региональной политики и обоснования способов решения новых проблем развития региональных систем.

Закон о распределении промышленности (Distribution of Industry Act 1950) не привнес качественно новых элементов в британскую практику государственного регулирования регионального развития и лишь незначительно отличался от действовавшего с 1945 года одноименного закона. Вынужденный отход лейбористского правительства от решения региональных проблем был открыто и сознательно завершён пришедшими в 1951 году к власти консерваторами. Последующие годы образно назывались периодом «затишья в региональной политике», фазой «пассивной региональной политики» или даже «смерти политики рассредоточения промышленности» [4]. Снижение приоритета указанной сферы деятельности правительства также было связано с тем, что в 1951—1958 гг. относительно стабилизировалось положение в отраслях экономики Великобритании (в угольной промышленности, судостроении и производстве оборудования для морских работ, железнодорожном машиностроении), определявших отношение к проблемным регионам.

Закон 1952 года о новом развитии (о новом развитии городов) (Town Development Act) позволил сделать этот процесс целенаправленным и регламентируемым. В первую очередь он касался городов, которые в результате их

расширения способны были принять излишек населения из крупных городов, и предоставления им для этих целей финансовой поддержки (Будущее планировки (исследование центра по изучению окружающей среды). М., 1976). За время, прошедшее с момента принятия закона 1946 года, строительство новых городов уже показало конкретные результаты, но и обнажило новые проблемы. Новый закон дополнял действующий и рассматривался как попытка осуществления административной реформы: развитие сотрудничества органов власти разных иерархических уровней с активным вовлечением в него муниципалитетов.

Именно это требование было положено в основу принципов разработки планов землепользования середины 1950-х гг. (аналогов современных планов правового зонирования), рассматриваемых как начало формирования современной системы градостроительного регулирования. Утвержденные регламенты землепользования стали для местных властей неким канонem принятия обоснованных управленческих решений в отношении перспектив развития территорий. При обращении к ним инвесторов по вопросам получения разрешения на строительство любого рода возникала техническая необходимость соизмерения их намерений с планами, и, в случае их несоответствия документам, они чаще всего получали отказ. Тем самым впервые была осуществлена на практике процедура правового обоснования инвестиционных планов заявителей, учитывающая внешние требования, направленные на защиту общественных интересов развития территории.

Обострение экономических (в том числе и региональных) проблем в Великобритании, связанное в значительной мере со спадом в мировой экономике в 1958—1959 гг., вновь стимулировало рост внимания к региональной политике, вызвавший обязательность финансирования программ развития территории и увеличения его объемов. Это выразилось в принятии Закона о распределении промышленности (Distribution of Industry (Industrial Finance) Act 1958). Он, по сравнению с ранее принятым законом 1945 года, был дополнен положениями, касающимися повышения гарантий в виде предоставления кредитов и грантов как условия привлечения предприятий непроизводственной сферы, расположенных в том числе и вне районов развития. Вновь активизировалась роль сертификатов, контролирующих и регламентирующих процессы освоения новых территорий в отдельных регионах. Способы их получения значительно различались. Так, например, в Юго-Восточном регионе и в центральных графствах Англии, по сравнению с другими регионами страны, их выдача ограничивалась.

Ухудшающееся положение в проблемных регионах (особенно в Шотландии) требовало дальнейшего реформирования региональной политики. Принятый в 1960 году Закон о местной занятости (Local Employment Act) отменял три отмеченных выше закона о распределении промышленности 1945, 1950 и 1958 годов, сохраняя и дополняя то же время состав инструментов, введенных еще в 1945 году. Полномочия по проведению региональной политики в более широком объеме сконцентрированы в Министерстве торговли за счет передачи ему ряда функций, выполняемых ранее Казначейством. В частности, предприниматели, строящие свои собственные предприятия, в том числе и непроизводственной сферы, в проблемных регионах, имели теперь возможность получения помощи в более доступной форме и гораздо быстрее.

Нововведения касались структурной организации территории, введения системы округов развития (development districts) и одновременного упразднения таких элементов структуры, как районы развития. Вводимый законом инструмент региональной политики понимался как гибкий и маневренный, реагирующий на изменения рыночной конъюнктуры и пространственного распределения безработных на территории регионов: количество и размеры округов развития не были постоянными и относительно часто уточнялись Министерством торговли. В частности, к 1966 году насчитывалось 165 округов развития. Использование такого «мозаичного» подхода, с одной стороны, нарушало планы расширения деятельности предпринимателей, а с другой — затрудняло долгосрочное прогнозирование органов власти, что не позволяло оценить его как позитивный.

Законом о местной занятости прямыми строительными субсидиями (льготными субсидиями на приобретение основных фондов) для создания инвесторами собственных предприятий в проблемных регионах был дополнен перечень стимулирующих мер. Ряд последующих, аналогичных ему, законодательных актов (1963, 1966, 1970, 1972 и 1975 гг.) существенно укрепил и расширил стимулы для проблемных регионов, ввел свободную амортизационную политику, ограничения на размещение учреждений в развитых регионах, прямое планирование регионального развития и т. п., что подтверждается динамикой прямых затрат Казначейства Великобритании на региональную политику (семикратным их увеличением в течение 1960—1980 гг.) [7].

Стимулы для проблемных регионов, в соответствии с Законами о финансах и о региональной занятости, принятыми в 1963 году (Finance and Local Employment Acts 1963), были существенно расширены и укреплены. Вплоть до 1970 года результативность региональной политики в Британии расценивалась экспертами и специалистами как высокая. Она достигалась благодаря использованию большого пакета управленческих инструментов, реализации широкомасштабной программы строительства государственных предприятий, регулярному инвестированию запланированных мероприятий, обеспечивающих региональное развитие, введению более жесткого контроля над размещением промышленности с помощью сертификатов на промышленное строительство и над размещением учреждений в Лондоне и Бирмингеме в форме разрешений на строительство офисов.

Для достижения этих целей образованы регионы экономического планирования (economic planning regions) с представительством в каждом из них совета по экономическому планированию (Regional Economic Planning Council) и управления экономического планирования (Regional Economic Planning Board) (всего восемь в Англии и по одному в Шотландии, Уэльсе и Северной Ирландии). Советы, назначаемые правительством, и управления различались и количественно, и качественно: в первые входили лидеры, представляющие интересы деловых, профсоюзных, научных и других кругов в соответствующих регионах, а вторые состояли из служащих, представлявших различные государственные и местные органы в этих регионах. Региональные советы по экономическому планированию ограничивались консалтинговыми функциями и участвовали в разработке общих стратегий регионального развития, чаще всего в вопросах оптимизации использования региональных ресурсов; обоснования «дорожных карт» выполнения региональных

планов на основе систематизации данных, предоставляемых Управлением экономического планирования. И крайне редко — в исследовании отдельных аспектов проведения национальной экономической политики регионального уровня [8].

В соответствии с принятым парламентом страны законом о контроле конторской занятости в 1965 году вводились серьезные ограничительные меры в отношении объектов делового назначения, размещение которых требовало получения специальных разрешений, аналогичных разрешениям на строительство новых производственных площадей. Принятие закона приходилось на середину 1960-х годов, когда необходимость пересмотра системы планирования, с отходом от регулирующего планирования в направлении приобретения им «указательных» элементов, стала очевидной.

Наличие этой проблемы было продиктовано актуализацией социальных последствий планирования, приданием государственного статуса задачам достижения и поддержания определенного уровня качества окружающей среды. Наиболее аргументированными были доводы в пользу того, что интересы социально незащищенных групп населения должны рассматриваться в рамках плановых мероприятий. При определении планов развития тех или иных территорий в первую очередь решались экономические проблемы привлечения инвестиций в промышленно активные сферы, часто возникали проблемы высвобождения необходимых для размещения этих объектов территорий: на них, например, могло проживать городское население.

Проблемы регионального развития этого времени объяснялись, кроме того, и другими причинами, связанными с отсутствием «точек соприкосновения» национального и регионального планирования в Великобритании [4, 7]. Национальный план 1965 года был основой новой системы регионального планирования. Его разработка пришлась на время кризиса социально-экономической системы страны, неустойчивости платежного баланса, что привело к изменениям в политике на макроуровне и рефреном отразилось на региональном уровне. Тем самым национальное планирование стало терять заявленные позиции, а система регионального планирования, в отсутствие национального плана, не получала верного импульса. Как следствие этого, из-за ограниченных полномочий консультативных органов, растущего недоверия к ним населения, не видевшего конкретных результатов их деятельности, а также сложностей оценки показателей эффективности, региональные советы по экономическому планированию были упразднены в 1980 году.

Выстраивание системы планирования с приоритетом экономических аспектов в условиях Британии позднее шло по пути интеграции региональных стратегий на национальном уровне при разработке национального плана. В попытке стимулировать регионы к инициированию мер региональной политики и максимальному учету реальных потребностей отдельных территорий не существовало специальных ограничений по выполнению региональных стратегий, а ввиду отсутствия единства методических требований к их разработке правительство испытывало большие трудности при сведении последних на национальном уровне [4, 5].

Тем не менее массированное наступление на региональные проблемы в Британии в середине и конце 1960-х гг. связывается главным образом не с отмеченным выше неудачным опытом в области экономического планирования,



а с использованием большого арсенала инструментов региональной политики. В последующее десятилетие (с 1966 по 1975 гг.) правительство Великобритании предпринимало постоянные попытки урегулирования вопросов региональной политики посредством разработки законодательных актов, направленных на гармонизацию социально-экономического и градостроительного аспектов развития регионов: Закона о промышленном развитии (Industrial Development Act 1966), Закона о местной занятости (Local Employment Act 1970), Закона о промышленности 1972 года (Industry Act 1972) и Закона о промышленности 1975 года (Industrial Act 1975). Основные положения этих законодательных актов рассматривали существующее состояние развития британских регионов, давали оценку показателям, определяли перспективу и устанавливали наиболее проблемные, «болевые» точки экономики страны с учетом их локализации на территории, прогнозировались ожидаемые результаты. На основании полученных данных мотивировалась степень государственного влияния на процессы развития, возможности вмешательства бизнес-сообщества в них, величина государственных дотаций и номенклатура инструментов управления территориями.

Сравнение положений, зафиксированных в принятых в эти годы федеральных законах Британии, показывает изменение характеристик объектов региональной политики (прежде всего «проблемных» регионов) и их типологии, объясняемое динамикой социально-экономической ситуации: районы развития (Закон о промышленном развитии 1966 года); промежуточные районы (Закон о местной занятости 1970 года); зоны «внутренних городов» (Закон о промышленности 1975 года).

Возврат к такому инструменту региональной политики, как районы развития и одновременный отказ от существующих 165 округов развития состоялся в результате принятия Закона о промышленном развитии в 1966 году. Согласно этому закону, внимание правительства страны сосредотачивалось на оценке действующих социально-экономических тенденций галопирующего развития отдельных сегментов третичного и четвертичного секторов экономики, приведших к образованию новых пяти районов развития, охватывающих в совокупности 40 % территории и 20 % населения Великобритании [4]. Их формирование означало установление ранжированного порядка субсидирования в районах развития, в то время как право «свободного», негосударственного инвестирования промышленности и строительства на этих территориях было ограничено и снижено до норм, определенных для всей территории страны.

На основании принятого в 1970 году Закона о местной занятости обозначился новый тип проблемных регионов — промежуточные районы (intermediate areas), в которых проживало ограниченное количество населения Великобритании не превышавшее 5 %. Их количество (первоначально семь) объяснялось сложившейся в районах ситуацией, требовавшей принятия мер ввиду низких показателей экономического роста, но при этом общее состояние районов не было критическим по сравнению со многими другими территориями страны. Соответственно, в отношении промежуточных районов требовалась выработка отдельных, специальных, инструментов региональной политики, в дополнении к действующему и апробированному к этому времени арсеналу средств.

Начиная с 1970 г. и в последующие годы, как результат идеологического и политического противостояния консерваторов и лейбористов в правительстве Великобритании, качественных изменений в содержание региональной политики не было внесено. Так, в момент принятия Закона о промышленности в 1972 году одновременно сосуществовали различные по сути и по форме разновременные типы проблемных регионов — районы развития, специальные районы, промежуточные районы, зафиксированные в ранее принятых и действовавших законодательных актах. Кроме того, законы предусматривали в отношении каждого из этих типов регионов специальные виды расходов (в том числе и субсидий) на региональное развитие (regional development grants). Порядок и величина их предоставления носили «плавающий» характер, подчиненный общим изменениям социально-экономических показателей развития этих территорий, пополнивший словарь региональной экономики термином «региональная селективная помощь».

К концу 1970-х годов, наряду с законодательными актами, обеспечивающими региональное развитие, был принят Закон о городском и сельском планировании, разработанный преемственно по отношению к одноименному закону 1947 г. (Будущее планировки (исследование центра по изучению окружающей среды). М., 1976) [16]. За время, прошедшее с момента своего утверждения, закон кардинально изменил не только отношения участников градостроительной деятельности, но и структуры, на первый взгляд имевшие только косвенное отношение к этому процессу. Закрепившаяся практика для принятия градостроительных решений система документации потребовала от ее разработчиков нового, системного, подхода к процедурам ее разработки и согласования. До принятия Закона 1968 года среди немногочисленных форм общественного участия в градостроительном процессе оставались публичные обсуждения (слушания) или же апелляционные заявления против решений контролирующих органов. Со временем этот порядок приобрел формальный характер и утратил свою значимость: фактор социализации в принятых решениях нивелировался. В этом смысле новый закон признавал значимость участия общественности как неотъемлемого элемента разработки и формализации решений по планированию развития территорий различных уровней.

В целом в течение второго (послевоенного) этапа региональной политики, проводившейся в Великобритании до конца 1970-х годов, получившего название традиционной политики, снижение ее приоритета было вызвано противостоянием по вопросу вмешательства государства в экономику двух наиболее влиятельных политических сил страны. Наряду с этим действовали и другие, объективные, факторы, отражающие изменения внешних и внутренних условий развития социально-экономической системы страны. Они, в свою очередь, определили перемены в характере региональных проблем, следовательно, и в государственной региональной политике.

Все это не способствовало результативности мероприятий региональной политики, несмотря на то, что правительство Великобритании постоянно предпринимало попытки по совершенствованию ее принципов. Великобритания, став страной-членом Европейского Сообщества (ЕС) в 1973 году (Региональная политика ЕС / Центр современных исследований ИМЭМО РАН ; отв. ред. В. А. Кузнецов. М. : ИМЭМО, РАН, 2009), тем самым с этого времени открыла своим проблемным регионам доступ к экономическим

инструментам (субсидиям, кредитам и т. п.) нового, межстранового, уровня, которые предоставлялись различными институтами ЕС. С позиций этого интегрированного подхода к проблеме развития регионов формировались предпосылки укрепления региональной политики отдельных стран-членов ЕС. Она становилась все менее зависимой от их национальных органов и все более вовлеченная в межрегиональную проблематику.

Для реализации новых целевых функций региональной политики, в соответствии с Законом 1975 года, были учреждены агентства развития Шотландии и Уэльса (Scottish and Welsh Development Agencies), призванные обеспечивать высокие показатели социально-экономического развития именно этих территорий. Существенно изменились подходы к установлению лимита пространственных параметров территорий страны, обозначенных как проблемные и требующие специального финансирования (на них проживало около 50 % работающих). Возникли так называемые проблемные зоны «внутренних городов» (inner cities areas), где наблюдался значительно более высокий отток населения, рост безработицы, преступности, наркомании, бедности, ухудшение жилищных условий, проявления социальной сегрегации, которые все более обострялись с годами, особенно в Лондоне и Бирмингеме. Так, за период с 1971 по 1981 гг. население периферийных районов Ливерпуля сократилось на 9,5 %, а в центре города — на 26,6 %, Манчестере соответствующие показатели составили 13,7 и 24,5 %, Ньюкасле — 11,0 и 18,0 %, Лондоне и Бирмингеме — 5,0 и 17,6 % [4, 6]. В то же время размеры помощи, оказываемой этим территориям, стали резко сокращаться. Все это потребовало смещения аспектов политики британского правительства на проблемы развития регионального развития, включая и городской уровень.

Последствия кризиса 1979—1981 гг. для национальной региональной политики Британии выражались, прежде всего, в том, что завершился ее второй — традиционный — этап, в течение которого проявились следующие ее тенденции. Использование в региональной политике принципа «переноса работы к рабочим» формировало характерную пространственную географию расселения населения, а рабочие места концентрировались в местах наивысшего скопления безработных. Правительство ограничивало возможности размещения компаний в отдельных регионах (например, в Юго-восточном регионе и в центральных графствах Англии) с помощью СПС и одновременно поощряло эти процессы в депрессивных регионах. Обработывающая промышленность, напротив, стала приоритетом региональной политики, что объясняется «мобильностью» основных производственных фондов, ее способностью замещать отмирающие сектора экономики, что позволило доминировать ей впоследствии в большинстве депрессивных регионов. В целом традиционная региональная политика была почти полностью монополизирована национальным правительством, а ее регулирующие инструменты сосредоточены в Министерстве торговли (с октября 1970 г. — в Министерстве торговли и промышленности).

За все предшествующие годы, ко второй половине 70-х годов XX века, система планирования в Великобритании сформировалась: была показана значимость методов долгосрочного прогнозирования, введения в практику моделирования альтернативных вариантов градостроительного развития и уточнения аналитических методов. В системе планирования произошли

заметные изменения: исключительно утилитарный подход к планированию, основанный на соотношении «расходы — прибыль», утрачивал свои ведущие позиции, проявлялись такие ее новые аспекты, как социализация. Они заключались в необходимости включения механизма учета социальных факторов при принятии решений, связанных с планированием развития территорий. Первостепенность для градостроительства общественных проблем означала повышение роли населения городов и регионов с его реальными потребностями в принятии таких решений, а получившие заметное развитие общественные движения за экологию и повышение уровня и качества жизни становятся обязательными участниками этого процесса.

При всем том, что система планирования Британии существенно обогатилась благодаря введению в нее новых компонентов, при этом не снижалась ее экономическая значимость. Градостроительное развитие районов, в свою очередь, находилось в прямой зависимости от сложившейся экономической системы. Неснижающаяся острота проблемы неравномерности развития районов — определения направлений территориально-пространственной политики — заставила вновь обратиться к практике создания корпораций развития, регламентирующих процедуры выделения средств государственного бюджета на приоритетные объекты развития.

Становление системы планирования способствовало конкретизации современных принципов управления территориальным развитием, в качестве основных элементов которого выделяются регулирование и контроль происходящих градостроительных преобразований.

Регулирующие градостроительную деятельность аспекты становятся приоритетами региональной политики. Повышение их значимости явилось закономерным следствием проводимой экономической политики: на смену стимулированию, отражающему определенный этап развития государства, пришло регламентирование. Необходимость рассмотрения этих вопросов на государственном уровне вызвала дифференциацию территорий (районов), реализующую принципы пространственной экономики, на две основные группы. Первая группа территорий отличалась способностью приносить прибыль, благодаря наличию сильной экономической базы и возможностям быстрого роста. Размещение на них приоритетных сфер деятельности, в частности, сферы обслуживания, стимулировало товарообмен и способствовало стабильному пополнению местных бюджетов. Вторую группу районов, в противоположность первой, формировали территории с высоким уровнем безработицы, нуждающиеся в финансовой помощи. Они, как правило, были не индустриализованы и слабо заселены, не имели возможности развивать сферы, способные приносить прибыль. Условием их последующего градостроительного развития была разработка комплексных мер по изменению ситуации — инфраструктурное обеспечение региона. Поскольку инфраструктурные компоненты, по сравнению, например, с обслуживающим сектором, практически не прибыльны и требуют крупных капиталовложений, их инвестирование обеспечивает государство. Соответственно, экономическая заинтересованность местных властей в инфраструктурных программах развития проблемных регионов, подчиненная данной зависимости, также не велика. По мере увеличения степени влияния деловой и коммерческих сфер деятельности на территориально-пространственные процессы повышается необходимость

введения регулирующих мер, позволяющих регламентировать экспансию непроизводственных функций. Идеи активного использования мер регулирования развития территории на протяжении последующих двух десятилетий оставались актуальными.

К концу 1970-х годов территориально-пространственными акцентами региональной политики Великобритании оставались новые города, а обоснование и разработка принципов их развития являлись вектором современного градостроительства. В практике реализации программ строительства новых городов выделяются характерные этапы, в рамках каждого из которых выделялись города «разных поколений» (по В. П. Максаковскому [17]): города первого поколения, возникшие в 1946—1950 гг. (12 — в Англии и Уэльсе и 2 — в Шотландии); второго поколения, построенные в 1955—1960 гг. (один город в Шотландии); 12 городов третьего поколения, сооруженных с 1961 по 1967 гг., и семь городов четвертого поколения, построенных после 1968 г. Таким образом, всего после Второй мировой войны в Великобритании появилось 34 новых города, группирующихся в основном вокруг проблемных городов с населением около 2 млн чел (1990 г.), создание которых преследовало цели реализации политики разукрупнения агломераций. Было признано, что комплексные мероприятия по ограничению развитию Лондона и Бирмингема завершились, действующие в этом отношении положения отменялись, а правительственные средства на эти градостроительные программы сокращались.

В последующие годы, с приходом к власти правительства консерваторов во главе с М. Тэтчер, процесс разгосударствления и секвестирования государственного бюджета ускорился, а расходы на программы регионального развития страны сократились. Функционирующие все эти годы 30 корпораций по развитию новых городов, в связи с ликвидацией самого объекта функционирования, сворачивали свою деятельность. В начале 1990-х гг. оставалось всего пять корпораций в Шотландии, но свои функциональные обязанности они осуществляли в ограниченном виде. На смену изжившему себя поколению новых городов, прошедших путь от идеи к практической реализации, приходили тенденции территориально-пространственной политики, отражающие принципиально изменившиеся требования технологического развития к социально-экономическим системам. Как реакция на требования времени формулируются новые концепции региональной политики, а в качестве ее приоритетных объектов выделяются «зоны экономической (предпринимательской) активности», технополисы, иннограды, формирующиеся на основе принципов интеграция процессов социально-экономического и градостроительного развития регионов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семенов В. Н. Благоустройство городов. М., 2003.
2. Хауке М. О. Ограничение роста крупных городов // Планировка и застройка больших городов. М., 1961. С. 5—27.
3. Бунин А. В., Саваренская Т. Ф. История градостроительного искусства. Т. II.
4. Фатеев В. С. Региональная политика: теория и практика. Минск, 2004.
5. Артоболовский С. С. Западный опыт реализации региональной политики: возможности и ограничения практического использования // Региональные исследования. 2008. № 3 (18).
6. Холл П. Городское и региональное планирование. М., 1993.
7. Селф П. Города выходят из своих границ. М., 1962.
8. Мерлен П. Новые города. Районная планировка и градостроительство. М., 1975.

9. Хауке М. О. Пригородные зоны городов. М., 1961.
10. Варламов В. С. Новые города-спутники в Великобритании и других капиталистических странах // Города-спутники. М., 1961. С. 137—149.
11. Кибл Л. Городская и районная планировка. М., 1965.
12. Донцов Д. Г., Игнатьев В. А., Юшкова Н. Г. Концепции регулирования использования и застройки территории Царицына — Сталинграда — Волгограда. М., 2003.
13. Вольфензон Е. Я. Вопросы планировки и застройки городов за рубежом. М., 1958.
14. Хромов Ю. Б. Регламентация градостроительной деятельности в России и за рубежом // Вопросы архитектуры и градостроительства. М., 1999. С. 4—59.
15. Смоляр И. М. Градостроительное планирование как система: прогнозирование, программирование, проектирование. М., 2001.
16. Смоляр И. М. Градостроительное право. Теоретические основы. М., 2000.
17. Макаковский В. П. Географическая картина мира. Книга 2. Региональная характеристика мира. М., 2009.
1. Semenov V. N. Blagoustroystvo gorodov. M., 2003.
2. Khauke M. O. Ogranichenie rosta krupnykh gorodov // Planirovka i zastroyka bol'shikh gorodov. M., 1961. S. 5—27.
3. Bunin A. V., Savarenskaya T. F. Istoriya gradostroitel'nogo iskusstva. T. II.
4. Fateev V. S. Regional'naya politika: teoriya i praktika. Minsk, 2004.
5. Artobolevskiy S. S. Zapadnyy opyt realizatsii regional'noy politiki: vozmozhnosti i ogranicheniya prakticheskogo ispol'zovaniya // Regional'nye issledovaniya. 2008. № 3 (18).
6. Khol P. Gorodskoe i regional'noe planirovanie. M., 1993.
7. Self P. Goroda vykhodyat iz svoikh granits. M., 1962.
8. Merlen P. Novye goroda. Rayonnaya planirovka i gradostroitel'stvo. M., 1975.
9. Khauke M. O. Prigorodnye zony gorodov. M., 1961.
10. Varlamov V. S. Novye goroda-sputniki v Velikobritanii i drugih kapitalisticheskikh stranakh // Goroda-sputniki. M., 1961. S. 137—149.
11. Kibl L. Gorodskaya i rayonnaya planirovka. M., 1965.
12. Dontsov D. G., Ignat'ev V. A., Yushkova N. G. Kontseptsii regulirovaniya ispol'zovaniya i zastroyki territorii Tsaritsyna — Stalingrada — Volgograda. M., 2003.
13. Vol'fenzon E. Ya. Voprosy planirovki i zastroyki gorodov za rubezhom. M., 1958.
14. Khromov Yu. B. Reglamentatsiya gradostroitel'noy deyatel'nosti v Rossii i za rubezhom // Voprosy arkhitektury i gradostroitel'stva. M., 1999. S. 4—59.
15. Smolyar I. M. Gradostroitel'noe planirovanie kak sistema: prognozirovanie, programmirovanie, proektirovanie. M., 2001.
16. Smolyar I. M. Gradostroitel'noe pravo. Teoreticheskie osnovy. M., 2000.
17. Maksakovskiy V. P. Geograficheskaya kartina mira. Kniga 2. Regional'naya kharakteristika mira. M., 2009.

© Юшкова Н. Г., 2014

Поступила в редакцию  
в декабре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Юшкова Н. Г. Территориально-пространственная политика развития градостроительных систем регионов: ретроспектива законодательных основ // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 212—230.

**ИННОВАЦИИ В СТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ,  
ИНТЕНСИФИКАЦИЯ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ  
И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ**

УДК: 625.078.8

**В. С. Боровик, В. В. Боровик**

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ВНЕДРЕНИЯ  
НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ В ДОРОЖНОМ ПРЕДПРИЯТИИ**

Разработана система визуализации процесса прогнозирования внедрения новой технологии в дорожном предприятии на основе производственной функции (ПФ). Внедрение рассматривается как алгебраическое введение в ПФ некоторых дифференциалов  $dx_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , относительно соответствующих производственных факторов  $x_i$  (ресурсов). Такая постановка обусловлена необходимостью осуществлять приращение либо сокращение ресурсов при внедрении новой технологии. Визуализация позволяет наглядно представить и выбрать направление и содержание процесса внедрения прогрессивной технологии в реальных условиях использования производственных ресурсов.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** визуализация, внедрение новых технологий, моделирование внедрения, производственная функция, интенсивность использования ресурсов.

The system for the visualization of the prediction process of new technology infusion into road enterprise on the basis of the production function type (PF) is developed. Infusion is considered as the introduction to algebraic PF of some differentials  $dx_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , relative to the corresponding production factors  $x_i$  (resources). Such formulation is determined by the necessity to implement the increment or reduction of resources when infusing new technology. The visualization allows you to visualize and choose the direction and content of the process of new technology introduction under real conditions of use of productive resources

**K e y w o r d s:** visualization, new technologies infusion, modeling of introduction, production function, resources usage rate.

«Инновации в России в настоящее время должны обеспечивать решение стратегических задач по жизнеобеспечению населения, по постепенному переходу страны на траекторию прогрессивного устойчивого развития, а не по «заполнению рынка», «обеспечению макроэкономической стабилизации» и т. д. Большинство жизненно важных для России инноваций имеет нерыночный характер. Это производство качественных и доступных населению продуктов питания и лекарств, строительство жилья и дорог...» [1].

Дорожно-строительные предприятия, как организационно-хозяйственные системы, решающие задачу прогрессивного устойчивого развития, могут рассматриваться как организации, в которых осуществляется полный цикл, состоящий из производства продукции, ее реализации и воспроизводства израсходованных ресурсов за счет полученного от реализации дохода [2]. В качестве

наиболее универсальной формы анализа функционирования организационно-хозяйственных систем предлагается использовать производственную функцию (ПФ) [3], например, вида

$$Y = C_0 \prod_{i=1}^n x_i^{\alpha_i}, \quad (1)$$

где  $Y$  — расчетный индекс (например, объем работ и др.) в натурально-вещественном или стоимостном выражении;  $C_0$  — коэффициент нейтральной эффективности (характеризует совокупное влияние факторов, не учтенных моделью);  $x_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  — факторы (ресурсы), влияющие на  $Y$  (в натурально-вещественном или стоимостном выражении);  $\alpha_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  — «веса»-коэффициенты эластичности факторов  $x_i$  (характеризуют вклад  $x_i$  в  $Y$ ).

В качестве примера рассмотрим ПФ двух предприятий:

$$\begin{aligned} Y_1 &= 2,231x_1^{1,123}x_2^{0,934}x_3^{0,567}; \\ Y_2 &= 1,037x_1^{0,672}x_2^{0,785}x_3^{0,467}, \end{aligned}$$

где  $x_1$  — основные средства предприятия;  $x_2$  — оборотные средства;  $x_3$  — затраты труда.

Допустим, что у этих предприятий абсолютно одинаковые объемы ресурсов. Однако коэффициенты эластичности у первого предприятия больше, чем у второго. Это свидетельствует о том, что ресурсы у первого предприятия используются более интенсивно, чем у второго. Кроме этого, влияние факторов, не учтенных моделью  $C_0$ , на первом предприятии в два с лишним раза больше чем у второго. В конечном итоге получим  $Y_1 > Y_2$ . Подчеркнем, что это только при совершенно одинаковых объемах затраченных ресурсов.

В этой связи любое внедрение нами предлагается рассматривать как алгебраическое введение в ПФ некоторых дифференциалов  $dx_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , относительно соответствующих производственных ресурсов  $x_i$ . Такая постановка обусловлена необходимостью осуществлять при внедрении новой технологии либо приращение, либо сокращение ресурсов. Например, внедрение новой прогрессивной технологии предполагает увеличение основных средств  $x_1$ . Тогда, как правило, использование высокопроизводительных машин и механизмов способствует увеличению потребления оборотных средств  $x_2$  и, например, сокращению затрат на труд  $x_3$ . Следовательно, в ПФ необходимо ввести:  $dx_1, dx_2, -dx_3$ . Эффективность освоения этих дифференциалов будет различной в зависимости от качества управления этим процессом. Учитывая, что на первом предприятии обеспечивается более интенсивное использование производственных ресурсов, можно априори предположить, что при всех прочих равных условиях введение в ПФ первого предприятия дифференциалов ресурсов  $dx_i$ ,  $i = \overline{1, 3}$ , связанных с внедрением прогрессивной технологии, даст больший прирост  $\Delta Y$  [4, 6].

Итак, пусть (1) — некоторая производственная функция. Очевидно, в зависимости от экономической политики освоение  $dx_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , может идти по-разному. В общем случае коэффициент освоения

$$0 \leq \frac{dx_{i_{\text{осв}}}}{dx_i}, i = \overline{1, n} \text{ — для каждого из дифференциалов.}$$



Понятно, что высокий коэффициент освоения еще не гарантирует целесообразность внедрения. Актуальным является вопрос о цене освоения вектора  $\{dx_i\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Возникает острая необходимость введения качественной характеристики процесса внедрения, оценки управления внедрением, что в свою очередь предполагает определенную эластичность замещения факторов  $x_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Заметим, что факторы  $x_i = x_i(t)$ ,  $i = \overline{1, n}$  ( $t$  — время) являются, как правило, непрерывными функциями по  $t$  и для  $t \in [t_0, t_i]$  определяют некоторую область  $G$ . Тогда технико-экономическую политику (способ освоения  $\{x_i dx_i\}$   $i = \overline{1, n}$ ) можно представить траекторией в некотором фазовом пространстве с обобщенными координатами  $x_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Отметим, что функция (1) не имеет не только абсолютного максимума, но и локальных экстремумов. Поэтому самое лучшее, на что можно рассчитывать, если руководствоваться величиной индекса  $Y$ , выбирая ту или иную траекторию управления в области  $G$ , это получить наибольшее  $\Delta Y$  при минимальных затратах  $\{x_i dx_i\}$   $i = \overline{1, n}$ . Если обозначить через  $\rho$  некоторый показатель качества управления, то можно заметить, что  $x_i$ ,  $dx_i$ ,  $\Delta Y$ ,  $\rho$  — мультиколлинеарны и едва ли есть практический смысл в выяснении характера этих зависимостей в данной статье, касающейся лишь вопроса оценки эффективности управления, хотя само по себе качество управления  $\rho$  должно учитывать взаимозависимость всех факторов.

Считаем, что все не учтенные факторы вносят свой вклад в самый обобщенный показатель функционирования системы, а именно определяют положение кривой управления в области  $G$ , что в свою очередь определит «отстояние» ее от некоторой фиксированной траектории  $f_0(x_i)$ ,  $i = \overline{1, n}$ .

Если достаточно обоснованно выбрать  $f_0(x_i)$ , то «отстояние» от нее  $f(x_i) = 0$ ,  $i = \overline{1, n}$  — соответствующей реальному «потреблению» ресурсов  $x_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  можно рассматривать как оценку экономической политики с позиции получения  $Y_{\max}$ . Понятно, что вопрос должен быть рассмотрен в гильбертовом пространстве, где эта оценка получится естественно при задании соответствующей метрики. Одной из целей этой работы является выяснение на основе предварительной оценки качества управления необходимости и возможности внедрения. Причем предварительный отрицательный ответ не снимает внедрение с повестки дня, а лишь требует переключения внимания на факторы, влияющие на  $\rho$ , с целью подготовки системы к восприятию вектора  $\{dx_i\}$   $i = \overline{1, n}$ .

Рассмотрим подробнее вопросы целесообразности внедрения с точки зрения максимизации результата — индекса  $Y$  (рис. 1).

Как видно из рис. 1, один и тот же объем  $1Y1$  может быть выполнен на конкретном предприятии, для которого рассчитана ПФ, бесчисленным множеством сочетаний труда и прочих ресурсов. Например, для выполнения объема  $1Y1$  в точке  $A_1$  необходимо затратить значительно большее количество труда, чем в точке  $B_1$  ( $0Ax_1 > 0Bx_1$ ). Однако затраты прочих ресурсов в точке  $A_1$  значительно ниже, чем в  $B_1$  ( $0Ax_2 < 0Bx_2$ ). В зависимости от возможностей предприятия, условий его работы, цели и задач выбирается тот или иной вариант использования ресурсов.



Как видно на рис. 2, из точки  $A$ , характеризующейся объемом работ  $1Y$ , объем работ  $2Y$  может быть выполнен на конкретном предприятии, для которого рассчитана ПФ, бесчисленным множеством сочетаний труда и прочих ресурсов, например,  $B$ ,  $C$  и  $D$ . В зависимости от возможностей предприятия, квалификации кадров, условий его работы, цели и задач выбирается тот или иной вариант использования ресурсов.

Для достижения объема работ  $2Y$  имеется бесчисленное множество вариантов. Рассмотрим три —  $AB$ ,  $AC$  и  $AD$ . Каждому из них соответствует свое сочетание использования производственных ресурсов:  $Bx_1$   $Bx_2$ ,  $Cx_1$  и  $Cx_2$ ,  $Dx_1$  и  $Dx_2$ . Оптимальным с математических позиций является  $AB$ , так как  $AB \perp 2Y$  и является кратчайшим расстоянием.

Визуализация процесса внедрения позволяет наглядно показать, насколько внедряемая технология соответствует стратегии развития предприятия и соответствует ли она характеру использования производственных ресурсов на предприятии [6]. Варианты совершенствования технологии могут быть разными, например, представленные на рис. 3. В частности, вариант  $A_1D_1E_1$  при постоянных затратах труда и постоянном росте основных и оборотных средств обеспечивается в конечном итоге достижение цели  $N$ . Однако совершенствование технологии по направлению  $A_1B_1C_1$  наглядно и убедительно свидетельствует, что это направление совпадает с направлением стратегии предприятия и обеспечивает в итоге существенное сокращение затрат на достижение результата  $N$ .

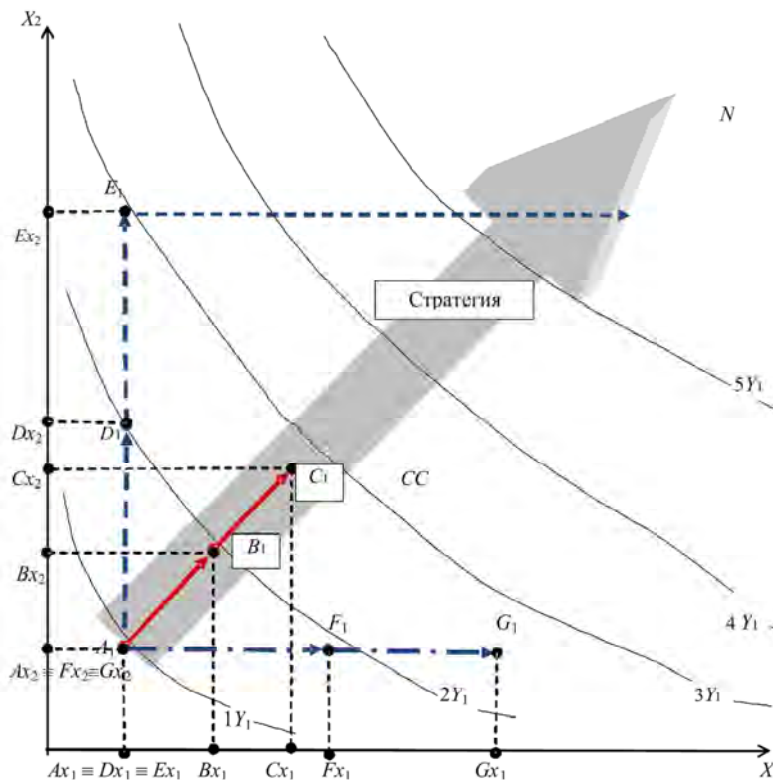


Рис. 3. Варианты выбора направления стратегии

Оптимальную траекторию, ведущую из точки  $(x_{i,0})$ ,  $i = \overline{1, n}$ , определим как линию, касательные к которой в каждой точке совпадают с вектором  $\nabla Y$ , т. е. обобщенные координаты векторов [7]:

$$\overline{dr}\{dx\}, i = \overline{1, n} \text{ и } \nabla Y \left\{ \frac{dy}{dx} \right\}, i = \overline{1, n} \text{ должны быть пропорциональны.}$$

Линеаризуя (1), получим

$$z = \lg C_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i U_i,$$

где  $z = \lg y U_i = \lg x_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ .

Выбирая соответствующие постоянные интегрирования, получим для оптимальной траектории

$$nU_j - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \frac{\alpha_j}{\alpha_i} U_i = 0,$$

где  $U_i$  — один из производственных ресурсов или в «реальных» параметрах:

$$x_j^{(0)} \left( \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n x_i^{\frac{\alpha_j}{\alpha_i}} \right)^{\frac{1}{n}} = \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n x_i^{\frac{\alpha_j}{n\alpha_i}}. \quad (2)$$

Заметим, что  $x_j^{(0)}$  есть функция аргумента  $t$  (время).

Пусть реальное управление (освоение производственных ресурсов) задано уравнением  $x_j \equiv x_j(t)$  (ясно, что все  $x_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  связаны через параметр  $t$ ).

Тогда качество управления естественно рассматривать как меру отклонения  $x_j$  от  $x_j^{(0)}$  в пространстве  $L_2(t_0; t_1)$ , т. е. ввести  $\rho$  следующим образом:

$$\rho(x_j^{(0)}, x_j) \equiv \rho = \left[ \int_{t_0}^{t_1} (x_j^{(0)}, x_j)^2 dt \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

Исходя из экономического смысла  $x_j^{(0)}$  и  $x_j$  непрерывности функции

$$\int_{t_0}^{t_1} (x_j^{(0)}) dt < \infty, \int_{t_0}^{t_1} (x_j^2) dt < \infty,$$

т. е. функция  $(x_j^{(0)} - x_j)$  интегрируема, в конечном смысле на отрезке  $[t_0; t_1]$ .

Аксиомы метрики, заданной формулой (2), выполняются очевидным образом:

$$\rho(x_j, x_j) = 0;$$

$$\rho(x_j^{(0)}, x_j^{(1)}) = \rho(x_j^{(1)}, x_j^{(0)});$$

$$\rho(x_j, x_j) \leq \rho(x_j^{(1)}, x^{(3)}) + \rho(x_j^{(2)}, x^{(3)}).$$

Следовательно, пространство управлений является метрическим с метрикой (3). Учитывая экономический смысл метрики, величину  $\rho(x_j^{(0)}, x_j)$ , принимаем за характеристику качества управления  $x_j$ . Как указано ранее, внедрение рассматривается как воздействие, изменяющее  $\{x_i\} \ i = \overline{1, n}$  на  $\{dx_i\} \ i = \overline{1, n}$ , т. е. как появление в системе вектора  $\{x_i + dx_i\} \ i = \overline{1, n}$ . Теоретический максимальный отклик  $Y_0$  на вектор  $\{dx_i\} \ i = \overline{1, n}$  определяется из (1) с учетом соотношения:

$$(x_j + dx_j)^0 = \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n (x_j + dx_j)^{\frac{\alpha_j}{\alpha_i}}. \quad (4)$$

Естественно предположить, что в действительности отклик  $Y_R$  будет отличаться от  $Y_0$  и притом тем больше, чем больше  $\rho(x_j^{(0)}, x_j)$ .

$Y_R$  можно с достаточной точностью аппроксимировать функцией

$$Y_R = \frac{a_0 Y_0}{1 + \rho(x_j^{(0)}, x_j) \frac{\Theta}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} \left( \sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial t} \right) dt}, \quad (5)$$

где  $0 \leq \Theta \leq 1$ ;  $a_0$  — множитель, определяющий необходимую размерность правой части формулы.

Заметим, что  $\lim_{\rho \rightarrow \infty} Y_R = 0$ ;  $Y_R \rightarrow 0$  и при

$$\frac{\Theta}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} \left( \sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial t} \right) dt \rightarrow \infty.$$

Это вполне объяснимо с точки зрения геометрии гиперповерхности (1).

Пусть  $S(dx)$ ,  $i = \overline{1, n}$  — затраты на внедрение;  $Y^* = Y(x_i^*)$ ,  $i = \overline{1, n}$  — расчетный индекс после внедрения технологии.

Тогда, очевидно, внедрение будет оправданным лишь при выполнении условия:

$$Y(x_i^*) = \frac{a_0 Y_0}{1 + \rho(x_j^{(0)}, x_j) \frac{\Theta}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} \left( \sum_{i=1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial t} \right) dt} - S(dx_i), \quad (6)$$

т. е. расчетный индекс за вычетом затрат на внедрение технологии и должен превышать значение индекса до внедрения. Так как проверка условия (6) при известной ПФ осуществляется до начала внедрения, то появляется возможность оценить заранее целесообразность проектируемого вмешательства в систему, а также наметить пути увеличения  $Y_R$  за счет уменьшения  $\rho(x_j^{(0)}, x_j)$ .

Визуализация позволяет наглядно представить направление и характер использования производственных ресурсов в реальных условиях внедрения новой технологии, планировать эффективность внедрения прогрессивной технологии на реальном предприятии, производственная деятельность которого, кроме количественных характеристик, выражается и качественными характеристиками использования ресурсов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Малинецкий Г. Г., Курдюмов С. П.* Нелинейная динамика и проблемы прогнозирования // Вестник Российской академии наук. Т. 71. 2001. № 3. С. 210—232.
2. *Клейнер Г. Б.* Стратегия предприятия. М. : Дело, 2008. 568 с.
3. *Клейнер Г. Б.* Производственные функции. Теория, методы, применение. М. : Финансы и статистика, 1986. 239 с.
4. *Боброва Т. В.* Модели управления реализацией инновационных проектов в дорожно-транспортном комплексе // Вестник СибАДИ. Юбилейный выпуск. 2010. № 4(18). Омск : СибАДИ. С. 60—64.
5. *Ярмолинский В. А., Хакимов А. М.* Повышение эффективности использования производственных ресурсов в условиях неопределенности финансирования дорожных проектов // Вестник Тихоокеанского гос. ун-та. 2011. № 1 (20).
6. *Скоробогатченко Д. А.* Нечеткая нейронная сеть прогнозирования эксплуатационного состава а.д. // Нейрокомпьютеры. 2011. № 10. С. 48—49.
7. *Боровик В. С., Боровик В. В., Прокопенко Ю. Е.* Моделирование управления внедрением новой технологии на основе производственной функции // Экономический анализ: теория и практика. 2013. № 42. С. 25—29.
1. *Malinetskiy G. G., Kurdyumov S. P.* Nelineynaya dinamika i problemy prognozirovaniya // Vestnik Rossiyskoy akademii nauk. T. 71. 2001. № 3. S. 210—232.
2. *Kleyner G. B.* Strategiya predpriyatiya. M. : Delo, 2008. 568 s.
3. *Kleyner G. B.* Proizvodstvennyye funktsii. Teoriya, metody, primeneniye. M. : Finansy i statistika, 1986. 239 s.
4. *Bobrova T. V.* Modeli upravleniya realizatsiey innovatsionnykh proektov v dorozhno-transportnom komplekse // Vestnik SibADI. Yubileynyy vypusk. 2010. № 4(18). Omsk : SibADI. S. 60—64.
5. *Yarmolinskiy V. A., Khakimov A. M.* Povysheniye effektivnosti ispol'zovaniya proizvodstvennykh resursov v usloviyakh neopredelennosti finansirovaniya dorozhnykh proektov // Vestnik Tikhookeanskogo gos. un-ta. 2011. № 1 (20).
6. *Skorobogatchenko D. A.* Nechetkaya neyronnaya set' prognozirovaniya ekspluatatsionnogo sostavleniya a.d. // Neyrokompyutery. 2011. № 10. S. 48—49.
7. *Borovik V. S., Borovik V. V., Prokopenko Yu. E.* Modelirovaniye upravleniya vnedreniem novoy tekhnologii na osnove proizvodstvennoy funktsii // Ekonomicheskiy analiz: teoriya i praktika. 2013. № 42. S. 25—29.

© Боровик В. С., Боровик В. В., 2014

Поступила в редакцию  
в декабре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

*Боровик В. С., Боровик В. В.* Визуализация процесса прогнозирования результатов внедрения новой технологии в дорожном предприятии // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 231—238.

## НАШИ АВТОРЫ

**Азаров Валерий Николаевич**  
Azarov Valery Nikolaevich

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой безопасности жизнедеятельности в техносфере, ВолгГАСУ  
Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Life Safety in Technosphere Department, VSUACE

**Акчури Талгат Кадимович**  
Akchurin Talgat Kadimovich

канд. техн. наук, проф., зав. кафедрой строительных материалов и специальных технологий, ВолгГАСУ  
Candidate of Engineering Science, Professor, the Head of Construction Materials and Special Technologies Department, VSUACE

**Алексиков Сергей Васильевич**  
Aleksikov Sergey Vasilevich

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительства и эксплуатации транспортных сооружений, ВолгГАСУ  
Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Construction and Operation of Transport Works Department, VSUACE

**Анопин Владимир Николаевич**  
Anopin Vladimir Nikolaevich

д-р географ. наук, проф., зав. кафедрой геодезии, ВолгГАСУ  
Doctor of Geographic Science, Professor, the Head of Geodesy Department, VSUACE

**Богомолов Александр Николаевич**  
Bogomolov Aleksandr Nikolaevich

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой гидротехнических и земляных сооружений, проректор по научной работе, ВолгГАСУ; проф. кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, [banzaritcyn@mail.ru](mailto:banzaritcyn@mail.ru)  
Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Vice-Rector for Scientific Research, VSUACE; Professor of Construction Operations and Geotechnics Department, Perm National Research Polytechnic University

**Богомолова Оксана Александровна**  
Bogomolova Oksana Aleksandrovna

канд. техн. наук, доцент кафедры прикладной математики и вычислительной техники, ВолгГАСУ  
Candidate of Engineering Science, Docent of Application Mathematics and Computer Engineering Department, VSUACE

**Бондарев Борис Александрович**  
Bondarev Boris Aleksandrovich

д-р техн. наук, проф. кафедры строительных материалов и конструкций, Липецкий государственный технический университет, [kaf-st@stu.lipetsk.ru](mailto:kaf-st@stu.lipetsk.ru)  
Doctor of Engineering Science, Professor of Construction Materials and Structures Department, Lipetsk State Technical University

**Боровик Виталий Витальевич**  
Borovik Vitaly Vitalevich

канд. техн. наук, доцент кафедры строительства и эксплуатации транспортных сооружений, ВолгГАСУ, [borovikv70@mail.ru](mailto:borovikv70@mail.ru)  
Candidate of Engineering Science, Docent of Construction and Operation of Transport Works Department, VSUACE

**Боровик Виталий Сергеевич**  
Borovik Vitaly Sergeevich

д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой экономики и управления дорожным хозяйством, ВолгГАСУ, [borovikv@mail.ru](mailto:borovikv@mail.ru)  
Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Economy and Administration of Public Roads Department, VSUACE

**Воробьев Владимир Иванович**  
Vorobev Vladimir Ivanovich

канд. техн. наук, доц., проф. кафедры экологического строительства и городского хозяйства, ВолгГАСУ, [vorobiov\\_51\\_vi@list.ru](mailto:vorobiov_51_vi@list.ru)  
Candidate of Engineering Science, Docent, Professor of Ecological Building and Municipal Facilities Department, VSUACE

**Ганжа Ольга Александровна**  
Ganzha Olga Aleksandrovna

канд. техн. наук, доцент кафедры экологического строительства и городского хозяйства, ВолгГАСУ, [ganzha\\_olga@mail.ru](mailto:ganzha_olga@mail.ru)  
Candidate of Engineering Science, Docent of Ecological Building and Municipal Facilities Department, VSUACE

**Григорьев Павел Николаевич**  
Grigorev Pavel Nikolaevich

старший преподаватель кафедры строительных конструкций, зданий и сооружений, Петербургский государственный университет путей сообщения, [grigorvevnp@mail.ru](mailto:grigorvevnp@mail.ru)  
Senior Lecturer of Engineering Constructions, Buildings and Structures Department, Petersburg State Transport University

**Груздо Игорь Юрьевич**  
Gruzdo Igor Yurevich

аспирант кафедры архитектуры, ВолгГАСУ, [igruzdo@yandex.ru](mailto:igruzdo@yandex.ru)  
Postgraduate Student of Architecture Department, VSUACE

**Денисов Иван Владимирович**  
Denisov Ivan Vladimirovich

аспирант кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, ВолгГАСУ, [IvanD1989@yandex.ru](mailto:IvanD1989@yandex.ru)  
Postgraduate Student of Engineering Structures, Foundations and Safety of Constructions Department, VSUACE

**Дружинин Константин Васильевич**  
Druzhinin Konstantin Vasilevich

аспирант кафедры технологии строительного производства, ВолгГАСУ, [konstantin-druzh@mail.ru](mailto:konstantin-druzh@mail.ru)  
Postgraduate Student of Construction Technology Department, VSUACE

**Евтушенко Сергей Иванович**  
Evtushenko Sergey Ivanovich

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой сопротивления материалов, строительной и прикладной механики, Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)  
Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Strength of Materials, Structural and Applied Mechanics Department, South-Russian State Polytechnic University (Novocherkassk Polytechnic Institute)

**Егоров Владимир Викторович**  
Egorov Vladimir Viktorovich

д-р техн. наук, доцент, декан факультета мостов и тоннелей, заведующий кафедрой строительных конструкций, зданий и сооружений, Петербургский государственный университет путей сообщения, [ve209@yandex.ru](mailto:ve209@yandex.ru)  
Doctor of Engineering Science, Docent, Dean of Bridges and Tunnels Faculty, Head of Engineering Constructions, Buildings and Structures Department, Petersburg State Transport University

**Ермилов Александр Александрович**  
Ermilov Aleksandr Aleksandrovich

аспирант кафедры строительства и эксплуатации транспортных сооружений, ВолгГАСУ; ведущий инженер Отдела эксплуатации автомобильных дорог, ОГУП «Волггарадавтодор», [alexandr.ermilov22@gmail.com](mailto:alexandr.ermilov22@gmail.com)  
Postgraduate Student of Construction and Operation of Transport Works Department, VSUACE; Leading Engineer of Highways Operation Division, SUE «Volgogradavtodor»

**Ерофеев Владимир Трофимович**  
Erofeev Vladimir Trofimovich

д-р техн. наук, член-кор. РААСН, профессор, заведующий кафедрой строительных материалов и технологий, Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева

Doctor of Engineering Science, Corresponding member of RAACS, Professor, the Head of Construction Materials and Technologies Department, Mordovian State University named after N. P. Ogarev

**Жарков Анатолий Федорович**  
Zharkov Anatoly Fedorovich

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, ВолгГАСУ, [jarko55@yandex.ru](mailto:jarko55@yandex.ru)

Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Engineering Structures, Foundations and Safety of Constructions Department, VSUACE

**Жатикова Мария Сергеевна**

Zhatikova Mariya Sergeevna  
**Захаров Александр Викторович**  
Zakharov Aleksandr Viktorovich

аспирантка кафедры градостроительства, ВолгГАСУ, [mzhatikova@mail.ru](mailto:mzhatikova@mail.ru)

Postgraduate Student of Urban Development Department, VSUACE

доцент кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, [miks@pstu.ru](mailto:miks@pstu.ru)

Docent of Construction Operations and Geotechnics Department, Perm National Research Polytechnic University

**Игнатьев Владимир Александрович**  
Ignatev Vladimir Aleksandrovich

д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, советник РААСН, зав. кафедрой строительной механики, ВолгГАСУ

Doctor of Engineering Science, Professor, Honoured Master of Sciences and Engineering of the RF, Counsellor of RAACS, the Head of Structural Mechanics Department, VSUACE

**Калашникова Анастасия Сергеевна**  
Kalashnikova Anastasiya Sergeevna

аспирантка кафедры строительных материалов и специальных технологий, ВолгГАСУ

Postgraduate Student of Construction Materials and Special Technologies Department, VSUACE

**Карпушко Марина Олеговна**  
Karpushko Marina Olegovna

ассистент кафедры строительства и эксплуатации транспортных сооружений, ВолгГАСУ

Assistant of Construction and Operation of Transport Works Department, VSUACE

**Корниенко Сергей Валерьевич**  
Kornienko Sergey Valerevich

канд. техн. наук, доцент, ВолгГАСУ

Candidate of Engineering Science, Docent, VSUACE

**Крахмальная Марина Петровна**  
Krakhmalnaya Marina Petrovna

аспирантка кафедры сопротивления материалов, строительной и прикладной механики, Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт), [marischka\\_86@mail.ru](mailto:marischka_86@mail.ru)

Postgraduate Student of Strength of Materials, Structural and Applied Mechanics Department, South-Russian State Polytechnic University (Novocherkassk Polytechnic Institute)

**Крахмальный Тимофей Александрович**  
Krakhmalny Timofey Aleksandrovich

канд. техн. наук, доцент кафедры сопротивления материалов, строительной и прикладной механики, Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт), [Timon\\_82@mail.ru](mailto:Timon_82@mail.ru)

Candidate of Engineering Science, Docent of Strength of Materials, Structural and Applied Mechanics Department, South-Russian State Polytechnic University (Novocherkassk Polytechnic Institute)

**Леснов Виталий Викторович**  
Lesnov Vitaliy Viktorovich

канд. техн. наук, доцент, доцент каф. строительных материалов и технологий, Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева

Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Construction Materials and Technologies Department, Mordovian State University named after N. P. Ogarev

**Маринин Никита Андреевич**  
Marinin Nikita Andreevich

аспирант, ВолгГАСУ

Postgraduate Student, VSUACE

**Масляев Александр Викторович**  
Maslyaev Aleksandr Viktorovich

канд. техн. наук, эксперт ГУ РИНКЦЭ по сейсмологии и сейсмостойкому строительству, Научно-исследовательская сейсмологическая лаборатория, ВолгГАСУ

Candidate of Engineering Science, Expert of GA RRSCCE on Seismology and Antiseismic Construction, R&D Seismological Laboratory, VSUACE

**Медведев Данил Павлович**  
Medvedev Danil Pavlovich

магистрант кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, [spsstf@pstu.ru](mailto:spsstf@pstu.ru)

Master's Degree Student of Construction Operations and Geotechnics Department, Perm National Research Polytechnic University

**Перекоженцев Анатолий Георгиевич**  
Perekhozhentsev Anatoly Georgievich

д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой архитектуры, ВолгГАСУ, [pag@mail.ru](mailto:pag@mail.ru)

Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Architecture Department, VSUACE

**Подлинев Максим Олегович**  
Podlinev Maksim Olegovich

аспирант кафедры гидротехнических и земляных сооружений, ВолгГАСУ

Postgraduate Student of Hydraulic and Earthwork Structures Department, VSUACE

**Прилепский Денис Владимирович**  
Prilepsky Denis Vladimirovich

инженер, НИЦ «Инвент», [volgcity@mail.ru](mailto:volgcity@mail.ru)

Engineer, "Invent" R&D

**Прокопенко Вячеслав Валентинович**  
Prokopenko Vyacheslav Valentinovich

ассистент кафедры экологического строительства и городского хозяйства, ВолгГАСУ, [v.v.p\\_24@mail.ru](mailto:v.v.p_24@mail.ru)

Assistant of Ecological Building and Municipal Facilities Department, VSUACE

**Пушкарская Ольга Юрьевна**  
Pushkarskaya Olga Yurevna

канд. техн. наук, доц. кафедры технологий обработки и производства материалов, Волжский институт строительства и технологий (филиал) ВолгГАСУ

Candidate of Engineering Science, Docent of Material Processing and Production Technology Department, Volzhsky Institute of Civil Engineering and Technologies (VISTeh), VSUACE



|                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Пшеничкина Валерия Александровна</b><br>Pshenichkina Valeriya Aleksandrovna | д-р техн. наук, профессор, ВолгГАСУ<br>Doctor of Engineering Science, Professor, VSUACE                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Ромашкин Виталий Николаевич</b><br>Romashkin Vitaly Nikolaevich             | аспирант кафедры строительной механики, ВолгГАСУ, <a href="mailto:rvitalik@list.ru">rvitalik@list.ru</a><br>Postgraduate Student of Structural Mechanics Department, VSUACE                                                                                                                             |
| <b>Рулев Глеб Александрович</b><br>Rulev Gleb Aleksandrovich                   | аспирант кафедры геодезии, ВолгГАСУ<br>Postgraduate Student of Geodesy Department, VSUACE                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Сапожкова Наталья Васильевна</b><br>Sapozhkova Natalya Vasilevna            | канд. техн. наук, доцент кафедры строительства и эксплуатации транспортных сооружений, ВолгГАСУ, <a href="mailto:sapozhkovav@rambler.ru">sapozhkovav@rambler.ru</a><br>Candidate of Engineering Science, Docent of Construction and Operation of Transport Works Department, VSUACE                     |
| <b>Сидоренко Владимир Федорович</b><br>Sidorenko Vladimir Fedorovich           | д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ, зав. кафедрой экологического строительства и городского хозяйства, ВолгГАСУ<br>Doctor of Engineering Science, Professor, Honoured Science Worker of the RF, the Head of Ecological Building and Municipal Facilities Department, VSUACE            |
| <b>Симончук Дмитрий Николаевич</b><br>Simonchuk Dmitry Nikolaevich             | аспирант кафедры строительства и эксплуатации транспортных сооружений, ВолгГАСУ<br>Postgraduate Student of Construction and Operation of Transport Works Department, VSUACE                                                                                                                             |
| <b>Суханов Андрей Владимирович</b><br>Sukhanov Andrey Vladimirovich            | аспирант кафедры сопротивления материалов, Липецкий государственный технический университет<br>Postgraduate Student of Strength of Materials Department, Lipetsk State Technical University                                                                                                             |
| <b>Сухина Ксения Николаевна</b><br>Sukhina Kseniya Nikolaevna                  | старший преподаватель кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, ВолгГАСУ<br>Senior Lecturer of Engineering Structures, Foundations and Safety of Constructions Department, VSUACE                                                                                            |
| <b>Тарабанов Михаил Григорьевич</b><br>Tarabanov Mikhail Grigorevich           | канд. техн. наук, доц., директор НИЦ «Инвент», 8-903-327-24-09<br>Candidate of Engineering Science, Docent, the Director of "Invent" R&D                                                                                                                                                                |
| <b>Ушаков Андрей Николаевич</b><br>Ushakov Andrey Nikolaevich                  | канд. техн. наук, доц., докторант кафедры гидротехнических и земляных сооружений, ВолгГАСУ, <a href="mailto:andrey.ushakov@vqi.volsu.ru">andrey.ushakov@vqi.volsu.ru</a><br>Candidate of Engineering Science, Docent, PhD candidate of Hydraulic and Earthwork Structures Department, VSUACE            |
| <b>Фокин Владимир Михайлович</b><br>Fokin Vladimir Mikhaylovich                | д-р техн. наук, профессор, заведующий каф. энергоснабжения и теплотехники, ВолгГАСУ<br>Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Power Supply and Heat Engineering Department, VSUACE                                                                                                       |
| <b>Харланов Владимир Леонтьевич</b><br>Kharlanov Vladimir Leontevich           | д-р техн. наук, доцент, проф. кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, ВолгГАСУ<br>Doctor of Engineering Science, Docent, Professor of Engineering Structures, Foundations and Safety of Constructions Department, VSUACE                                                   |
| <b>Хирис Наталья Сергеевна</b><br>Khiris Natalya Sergeevna                     | аспирантка кафедры строительных материалов и специальных технологий, ВолгГАСУ<br>Postgraduate Student of Construction Materials and Special Technologies Department, VSUACE                                                                                                                             |
| <b>Чебанова Светлана Александровна</b><br>Chebanova Svetlana Aleksandrovna     | ассистент кафедры технологии строительного производства, ВолгГАСУ, <a href="mailto:sveta_nes@mail.ru">sveta_nes@mail.ru</a><br>Assistant of Construction Technology Department, VSUACE                                                                                                                  |
| <b>Черноусов Николай Николаевич</b><br>Chernousov Nikolay Nikolaevich          | канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры сопротивления материалов, Липецкий государственный технический университет, <a href="mailto:ntotezis@mail.ru">ntotezis@mail.ru</a><br>Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Strength of Materials Department, Lipetsk State Technical University |
| <b>Черноусов Роман Николаевич</b><br>Chernousov Roman Nikolaevich              | канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры сопротивления материалов, Липецкий государственный технический университет, <a href="mailto:ozzgood@inbox.ru">ozzgood@inbox.ru</a><br>Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Strength of Materials Department, Lipetsk State Technical University |
| <b>Чеснокова Анна Николаевна</b><br>Chesnokova Anna Nikolaevna                 | аспирантка кафедры экологического строительства и городского хозяйства, ВолгГАСУ<br>Postgraduate Student of Ecological Building and Municipal Facilities, VSUACE                                                                                                                                        |
| <b>Чеснокова Оксана Геннадьевна</b><br>Chesnokova Oksana Gennadevna            | доцент кафедры архитектуры, ВолгГАСУ, <a href="mailto:oxxxana72@yandex.ru">oxxxana72@yandex.ru</a><br>Docent of Architecture Department, VSUACE                                                                                                                                                         |
| <b>Юфев Валерий Григорьевич</b><br>Yuferev Valery Grigorevich                  | д-р с/х наук, доцент, зав. лабораторией картографирования и анализа почв, ГНУ ВНИАЛМИ Россельхозакадемии<br>Doctor of Agricultural Science, Docent, the Head of the Laboratory of Mapping and Soil Analysis, GSI ARSRIA Rosselkhozacademiya                                                             |
| <b>Юшкова Наталия Геннадиевна</b><br>Yushkova Nataliya Gennadiyevna            | канд. арх., доцент кафедры архитектуры жилых и общественных зданий, ВолгГАСУ, (8442)96-98-59<br>Candidate of Architecture, Docent of Apartment and Public Buildings Architecture Department, VSUACE                                                                                                     |

**Примечание.** С авторами статей — аспирантами, докторантами и сотрудниками ВолгГАСУ — можно связаться по e-mail: [info@vgasu.ru](mailto:info@vgasu.ru) (в теме письма указать наименование структурного подразделения, фамилию и инициалы адресата).

### 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](http://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](http://www.doaj.org), обеспечивающую открытый доступ к полнотекстовым материалам научных и академических журналов на различных языках, поддерживающих систему контроля качества публикуемых статей.

**Требования к оформлению статей и сопроводительных материалов.** Статью необходимо представить на электронном носителе и в распечатанном виде (2 экз.) в сопровождении заполненного автором *лицензионного договора* (2 экз.) (скачать бланк по адресу <http://www.vgasu.ru/science/journals/herald-volggasu/preparation-requirements/>), *анкеты* согласия автора на доступ к его персональным данным неограниченного круга лиц (скачать бланк по адресу <http://www.vgasu.ru/science/journals/herald-volggasu/preparation-requirements/>), *выписки из протокола* заседания кафедры и одной *рецензии*. К статьям прилагается экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати. Все сопроводительные документы представляются на бумажных носителях в 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 (Cyr) № 11 (11 пунктов). Параметры страницы — поля, см: верхнее — 3,7; нижнее — 4,5; левое — 2,0; правое — 6,0; переплет — 0, поля зеркальные. Расстояние от края до верхнего колонтитула, см — 3,0, от края до нижнего колонтитула — 3,7. Абзацный отступ равен 0,75 см. Межстрочный интервал одинарный. Автоматически устанавливаются переносы (не более 4 подряд в одном абзаце). Автоматически устанавливается запрет висячих строк.

Для *набора формул* используется редактор формул *Microsoft MathType 5*; по умолчанию устанавливаются размеры шрифта для одно- и двухстрочных формул: обычного — 11 пт, крупного и мелкого индекса — соответственно 8 и 6 пунктов, крупного и мелкого символа — соответственно 16 и 11 пунктов. Греческие и русские буквы набираются прямым шрифтом, латинские — курсивом. Если написание в формулах отличается от традиционного, автор должен сделать соответствующие пометки на полях распечатанной статьи, при этом греческие буквы обводятся красным карандашом, готические — синим. Формулы выключаются в левый край с 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 A4 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 (Cyr) № 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 — иностранных. Источники группируются в списке в порядке упоминания в тексте. Ссылки на источники приводятся в тексте в квадратных скобках (запрещается использовать ссылки-сноски для указания источников). В библиографическую запись включаются только основные элементы библиографического описания (ГОСТ

7.0.5–2008). Разделительные знаки «тире» между областями опускаются. Шрифт Times New Roman (Суг) № 9 (9 пунктов). Язык библиографических записей соответствует языку описываемых источников.

*Библиографический список* приводится дважды. Во втором варианте все русскоязычные библиографические записи приводятся на латинице, записи на других языках просто повторяются.

Авторы статей несут всю полноту ответственности за содержание статей и за сам факт их публикации. Редакция журнала не несет никакой ответственности перед авторами и/или 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).*

ISSN 1815-4360. Серия «Строительство и архитектура»

#### **Тематические рубрики**

Строительные конструкции, здания и сооружения. Основания, фундаменты, подземные сооружения. Строительная механика. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов. Строительные материалы и изделия. Гидротехническое строительство. Гидравлика и инженерная гидрология. Технология и организация строительства. Безопасность жизнедеятельности и охрана труда в строительстве. Инновации в строительном производстве, интенсификация, энергосбережение и энергоэффективность. Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности. Градостроительство. Теория развития города. Управление инвестиционно-градоостроительной 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](http://www.vgasu.ru), в разделе *Издательская деятельность / 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](mailto: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](mailto: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 НТЦ «Информре-  
гистр», свидетельство № **594 от 20.10.11, номер гос. рег. 0421200065** (на 2012 г.), включен в базу РИНЦ  
([www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)).

Подробная информация на сайте журнала [www.vestnik.vgasu.ru](http://www.vestnik.vgasu.ru)

---

«Интернет-вестник ВолгГАСУ» не является электронной версией печатного журнала.  
Оба журнала содержат оригинальные публикации.

---

По вопросам публикации статей в научно-теоретическом журнале  
«**СОЦИОЛОГИЯ ГОРОДА**»  
обращаться к гл. редактору Б.А. Навроцкому по тел. 8-8442-96-99-25.  
Подписаться на журнал можно по каталогу «Пресса России», подписной индекс **29507**  
и по Интернет-каталогу на сайте агентства «Книга-Сервис», подписной индекс **Е 29507**.  
*Журнал включен в **Перечень** ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации,  
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций  
на соискание ученой степени доктора и кандидата наук,*  
***утвержденный ВАК** Министерства образования и науки Российской Федерации.*  
Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства  
в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия, свидетельство Эл № **ФС77-26286 от  
17.11.06**, Международным центром ISSN, **ISSN 1994-0351**, включен в базу РИНЦ ([www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)).  
Подробная информация о журнале на сайте ВолгГАСУ по адресу: [www.vgasu.ru](http://www.vgasu.ru)  
в разделе Наука / Научные журналы.

Научное издание

**ВЕСТНИК  
ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО  
УНИВЕРСИТЕТА**

Научно-теоретический и производственно-практический журнал

**Серия: Строительство и архитектура  
2014. Вып. 35 (54)**

Редактор *О. А. Шипунова*  
Перевод на английский язык *О.Ю. Юшко*  
Компьютерная правка и верстка *Н. А. Кашириной, А. Г. Сиволобовой*  
Компьютерный дизайн обложки *О. Ю. Мелешихин*  
Информационно-библиографическое обслуживание выпуска *Е. В. Хромова*

Подписано в печать 26.03.2014. Формат 70 × 108/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.  
Уч.-изд. л. 16,3. Усл. печ. л. 21,3. Тираж 500 экз. Заказ № 09

---

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет»  
Редакционно-издательский отдел  
Отдел оперативной полиграфии  
400074, Волгоград, ул. Академическая, 1