

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
И НАУКИ РФ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ  
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
**СТРОИТЕЛЬСТВО**

Научно-теоретический журнал  
Издается с марта 1958 г.  
Выходит один раз в месяц

№ 8 (668)  
Август 2014 г.

Главный редактор В.Г. Себешев, почет. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф.

Редакционная коллегия:

А.А. Афанасьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.  
В.Л. Баладинский, д-р техн. наук, проф.  
В.А. Воробьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.  
В.А. Игнатьев, д-р техн. наук, проф.  
В.И. Костин, д-р техн. наук, проф. (зам. гл. редактора)  
Г.Б. Лебедев, канд. техн. наук, доц. (зам. гл. редактора)  
Е.М. Лобанов, д-р техн. наук, проф.  
Л.С. Ляхович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.  
В.И. Морозов, д-р техн. наук, проф.  
Ю.П. Панибратов, акад. РААСН, д-р экон. наук, проф.  
Ю.П. Правдивец, д-р техн. наук, проф.  
В.Г. Себешев, почет. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф.  
Ю.А. Феофанов, д-р техн. наук, проф.  
Е.М. Чернышов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113  
Тел./факс +7 (383) 266 28 59  
[www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru) E-mail: [izvuz\\_str@sibstrin.ru](mailto:izvuz_str@sibstrin.ru)

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 30.08.14. Формат 70×108  $\frac{1}{16}$   
Усл. печ. л. 10,0+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 6767

ООО «Партнеры Сибири»,  
630009, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 16

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2014

**СОДЕРЖАНИЕ**

**ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

**Дукарт А.В., Олейник А.И.** Двухслойный континуальный гаситель колебаний 5

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ**

**Селяев В.П., Низина Т.А., Низин Д.Р., Фомин Н.Е., Юдин В.А.** Влияние алифатического разбавителя Этал-1 на упругопрочностные характеристики и щелочестойкость эпоксидных композитов ..... 14

**Галкин Ю.Ю., Пшеничный Г.Н.** О химическом аспекте ползучести цементных бетонов ..... 20

**Раков М.А., Бердов Г.И., Ильина Л.В.** Повышение прочности газобетона введением дисперсных минеральных добавок и электролитов ..... 27

**ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО**

**Бальзанников М.И.** Обоснование установленной мощности ГЭС энергетического гидроузла ..... 32

**САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА**

**Багоутдинова А.Г., Золотоносов Я.Д., Порохин В.Н.** Математическое моделирование винтовых теплообменных элементов ..... 41

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ**

**Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Гвоздев В.А.,**

<b>Канивец В.А., Малышев М.С.</b> Пневмоударный механизм дроссельно-бесклапанного типа и его физико-математическое описание .....	47
<b>Крашенинников Д.Д.</b> К вопросу определения конструктивных и технологических параметров башенных кранов .....	53
<b>Кузнецова В.Н., Савинкин В.В.</b> Исследование энергоемкости экскавационного цикла землеройной машины .....	60
<b>НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ</b>	
<b>Гашенко А.Е.</b> Теоретическая модель локально-целостного градостроительного образования .....	68
<b>НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ</b>	
<b>Авдеев Ю.В., Кононов А.Д., Кононов А.А., Варданян Н.А.</b> Метод компенсации погрешностей измерения координат при автоматическом дистанционном управлении машинами дорожно-строительного комплекса .....	75
<b>Данилов М.Н., Федорова Н.Н.</b> Методика расчета многослойных ограждающих конструкций с учетом нелинейных свойств материалов .....	81
<b>Илизаров А.Г., Коянкин А.А.</b> Апробация методики расчета прогибов изгибаемой балки кусочно-постоянного сечения, выполняемого с использованием прерывателей Герсеванова .....	93
<b>Талантова К.В.</b> Оптимизация расхода стальной фибры при проектировании конструкций на основе сталефибробетона .....	99
<b>Чернышев С.Н., Евграфова И.М., Неклюдов М.А.</b> О горизонтальной скорости пластического течения дисперсных грунтов у борта долины реки как причине деформаций и разрушения сооружений (к 125-летию со дня рождения И.В. Попова)	107

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE

OF RUSSIAN FEDERATION

INTERNATIONAL ASSOCIATION

OF CONSTRUCTION

HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

**NEWS OF HIGHER  
EDUCATIONAL INSTITUTIONS**

# CONSTRUCTION

Scientific-theoretical journal

Published since March 1958

Monthly

**N 8 (668)**

August 2014

*Editor-in-Chief* V.G. Sebeshev, PhD, Prof.,  
Honour. Mem. RAACS

*Editorial Board:*

- A.A. Afanasyev, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS  
V.L. Baladinsky, DSc (Eng), Prof.  
V.A. Vorobyov, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS  
V.A. Ignatyev, DSc (Eng), Prof.  
V.I. Kostin, DSc (Eng), Prof. (Deputy Editor-in-Chief)  
G.B. Lebedev, PhD, Ass. Prof. (Deputy Editor-in-Chief)  
Ye.M. Lobanov, DSc (Eng), Prof.  
L.S. Lyakhovich, DSc (Eng), Prof., Acad. RAACS  
V.I. Morozov, DSc (Eng), Prof.  
Yu.P. Panibratov, DSc (Econ), Prof., Acad. RAACS  
Yu.P. Pravdivetz, DSc (Eng), Prof.  
V.G. Sebeshev, PhD, Prof., Honour. Mem. RAACS  
Yu.A. Feofanov, DSc (Eng), Prof.  
Ye.M. Chernyshov, DSc (Eng), Prof., Acad. RAACS

Responsible secretary N.V. Bitkina

*The editorial office's address:*

113 Leningradskaya St. Novosibirsk 630008

 Phone number/fax +7 (383) 266 28 59  
[www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru) E-mail: [izvuz\\_str@sibstrin.ru](mailto:izvuz_str@sibstrin.ru)

## CONTENTS

### THE THEORY OF ENGINEERING SRTUCTURES

- Dukart A.V., Oleinik A.I.** Bilayer distributed vibration absorber ..... 5

### BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

- Selyaev V.P., Nizina T.A., Nizin D.R., Fomin N.E., Yudin V.A.** The influence of aliphatic thinner Etal-1 on the elastic-strength properties and alkali resistance of epoxy composites ..... 14

- Galkin Yu.Yu., Pshenichnyy G.N.** About the chemical aspects of cement concrete creep ..... 20

- Rakov M.A., Berdov G.I., Ilina L.V.** Increased strength aerated concrete introduction of dispersive mineral supplements and electrolytes ..... 27

### HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

- Balzannikov M.I.** Feasibility study of installed capacity at HPP hydroelectric complex ..... 32

### SANITARY ENGINEERING

- Bagoutdinova A.G., Zolotonosov Ya.D., Posohin V.N.** Mathematical modelling of screw heat exchange elements ..... 41

### BUILDING AND ROAD MACHINES

- Abramenkov D.E., Abramenchik E.A., Gvozdev V.A., Kanivets V.A.,**

<b>Malyshev M.S.</b> Pneumoshock mechanism throttle-valveless type and its physical-mathematical description .....	47
<b>Krasheninnikov D.D.</b> The problem of definition tower cranes of constructional and technological parameters .....	53
<b>Kuznetsova V.N., Savinkin V.B.</b> Study of energy consumption for excavating cycle of earth-moving machine .....	60
<b>SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND ECOLOGY</b>	
<b>Gashenko A.E.</b> Theoretical model of an urban pattern .....	68
<b>SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION</b>	
<b>Avdeev Yu.V., Kononov A.D., Kononov A.A., Vardanyan N.A.</b> Method of compensation of measuring errors of coordinates at self-acting full remote control by machines of a road-building complex .....	75
<b>Danilov M.N., Fedorova N.N.</b> Finite element modelling of nonlinear behavior of the multilayer constructions .....	81
<b>Ilizarov A.G., Koyankin A.A.</b> Differential equation of the bending of beams of variable cross-section is described with the help of breakers Gersevanov .....	93
<b>Talantova K.V.</b> Optimization of the consumption of steel fiber when designing structures based on steel fiber concrete .....	99
<b>Chernyshev S.N., Evgrafova I.M., Nekludov M.A.</b> On the horizontal velocity of plastic flow of loose soil at the side of the river valley as a cause of deformation and fracture structures (to the 125th anniversary since the birth of I.V. Popov) .....	107

# ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 624.042:534.014.2

А.В. ДУКАРТ, А.И. ОЛЕЙНИК

## ДВУХСЛОЙНЫЙ КОНТИНУАЛЬНЫЙ ГАСИТЕЛЬ КОЛЕБАНИЙ

Рассматривается динамический гаситель, предназначенный для демпфирования колебаний тонкостенных конструкций. Гаситель образован из большого числа параллельно установленных на защищаемой конструкции двухмассовых типовых элементов с малой частотной расстройкой звеньев. В предельном случае (при бесконечном числе присоединенных элементов) он представляет собой двухслойный континуальный гаситель с непрерывно изменяющейся («размазанной») частотной характеристикой. Разработана методика расчета защищаемой конструкции, моделируемой системой с одной степенью свободы и оборудованной предложенным континуальным гасителем, при гармонической возмущающей нагрузке. Анализируются динамические свойства полученной таким образом виброзащитной системы, которые характерны как для инерционных демпфирующих покрытий, так и для дискретных гасителей. Приведены амплитудные кривые колебаний массы защищаемой конструкции и дана оценка эффективности работы двухслойного континуального гасителя при нестабильной частоте воздействия.

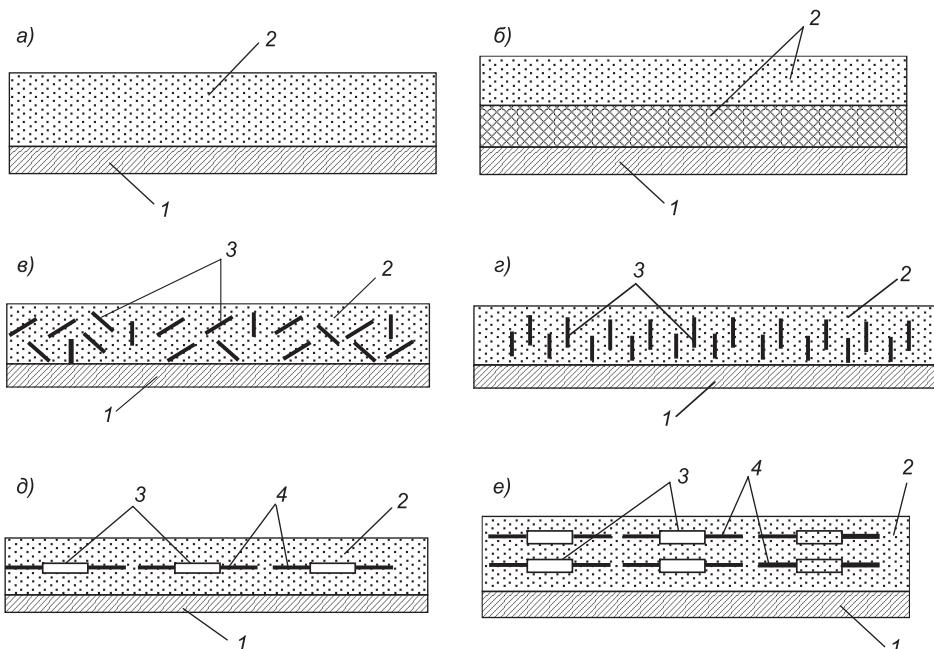
**Ключевые слова:** защищаемая конструкция, двухслойный континуальный гаситель, гармоническая нагрузка, амплитудно-частотная характеристика, эффективность гасителя.

Совершенствование методов виброзащиты современных конструкций и машин, колебания которых вызваны частотно широкополосными внешними воздействиями, приводит к постановке новых задач демпфирования колебаний и развитию конструктивных форм виброзащитных устройств, в том числе динамических гасителей колебаний (ДГК). В этой связи актуальным является синтез частотно широкополосных и более эффективных по сравнению с одномассовыми ДГК многомассовых гасителей. К наиболее простым подобным устройствам могут быть отнесены гасители колебаний пакетного типа, образованные из конечного числа параллельно установленных на защищаемой конструкции одно- и многомассовых ДГК [1–3]. Возможность распределения реакции гасителей по поверхности защищаемой системы и исключение больших сосредоточенных сил в местах их присоединения создают большие перспективы применения пакетных гасителей для демпфирования колебаний конструкций.

При бесконечном числе гасителей, распределенных на защищаемой тонкостенной конструкции, в теории виброзащиты принято говорить о континуальных гасителях типа волнового слоя [4, 5], которые по своим характеристикам близки к демпфирующим покрытиям инерционного типа. В [4] исследованы гармонические колебания однопролетной шарнирно опертой балки, оборудованной слоем гасителей, при настройке его

типовых элементов на первую резонансную частоту. Ввиду сильной разреженности спектра собственных частот колебаний балки защищаемая конструкция аппроксимирована системой с одной степенью свободы. Показано образование на амплитудно-частотной характеристике колебаний конструкции так называемой потенциальной ямы, которая характерна при использовании гасителей. Более общий случай виброзащиты оболочек и пластин с помощью континуальных гасителей исследован в [5], где найдены оптимальные параметры осцилляторов для основных расчетных ситуаций.

Поясним постановку рассматриваемой в настоящей статье задачи на примерах практической реализации континуальных гасителей, возможные варианты которых представлены на рис. 1. Как показано в работе [5], континуальный гаситель может быть реализован не только путем установки большого числа дискретных ДГК, но и путем нанесения на конструкцию демпфирующих покрытий (рис. 1, а), обладающих выраженным инерционными и диссипативными свойствами в трансверсальном направлении. Использование двухслойных и многослойных покрытий — перспективная модификация этого способа уменьшения колебаний тонкостенных конструкций (рис. 1, б). Известно, что эффективность демпфирующих покрытий существенно зависит от испытываемых ими деформаций, при этом она значительно возрастает с увеличением деформаций растяжения или сдвига [6–9]. В этом случае становится весомым вклад трансверсальных инерционных сил и деформаций, возникающих в покрытии. В этой связи возможно комбинированное использование демпфирующего слоя и дискретных элементов. В частности, для усиления виброзащитных свойств покрытия в демпфирующем слое могут быть



*Рис. 1. Варианты реализации континуальных гасителей, усиленных дискретными включениями*

1 — защищаемая конструкция; 2 — инерционный демпфирующий слой; 3 — дискретные массы; 4 — инерционные или безынерционные стержневые элементы

расположены («впаяны») дискретные инерционные включения, собственные частоты колебаний которых близки к резонансной частоте колебаний защищаемой конструкции (рис. 1, в–е).

На рис. 1, в показано покрытие с хаотическим расположением стержневых или пластинчатых включений, которые существенно влияют на характер распределения сдвиговых деформаций демпфирующего слоя, создавая области концентрации касательных напряжений. При ориентированном расположении большого числа фиброэлементов (рис. 1, г, д) последние могут рассматриваться как дополнительный пакет (или слой) динамических гасителей.

Развитием этой идеи является использование в качестве типового элемента системы двух упругосвязанных масс. Вариант конкретной реализации такой виброзащитной системы приведен на рис. 1, е. Здесь типовой элемент модели может рассматриваться как двухмассовый гаситель, а вся система — как двухслойный континуальный гаситель. Исследование эффективности такой модели является целью настоящей работы.

Будем считать, что защищаемая конструкция обладает разреженным спектром собственных частот колебаний и ее расчетная схема может быть приведена к системе с одной степенью свободы с обобщенной массой  $m_1$ . Сосредоточенную возмущающую нагрузку  $P(t)$  примем гармонической с постоянной амплитудой  $P_0$  и нестабильной частотой  $\theta$ , т.е.  $P(t) = P_0 \exp(i\theta t)$ . Для решения рассматриваемой задачи воспользуемся некоторыми соотношениями, полученными в [1] для пакетного гасителя с двухмассовыми типовыми элементами (рис. 2), считая число типовых элементов в пакете бесконечно большим. Запишем систему дифференциальных уравнений движения масс для  $k$ -го типового элемента пакета (рис. 3) при кинематическом гармоническом возбуждении  $y_1(t)$  с частотой  $\theta$ :

$$\begin{aligned} -m_{2,k} \ddot{y}_{2,k}(t) - c_{2,k} [y_{2,k}(t) - y_1(t)] + c_{3,k} [y_{3,k}(t) - y_1(t)] &= 0; \\ -m_{3,k} \ddot{y}_{3,k}(t) - c_{3,k} [y_{3,k}(t) - y_{2,k}(t)] &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $m_{2,k}$ ,  $c_{2,k}$ ,  $y_{2,k}$  — масса, квазиупругий коэффициент и абсолютная координата основного звена  $k$ -го типового элемента;

$m_{3,k}$ ,  $c_{3,k}$ ,  $y_{3,k}$  — то же для подстроичного звена;

$y_1(t)$  — функция, описывающая колебания массы  $m_1$  защищаемой конструкции.

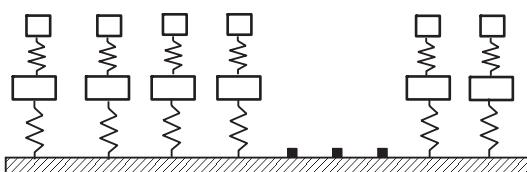


Рис. 2. Дискретное представление модифицированного континуального гасителя двухслойного типа

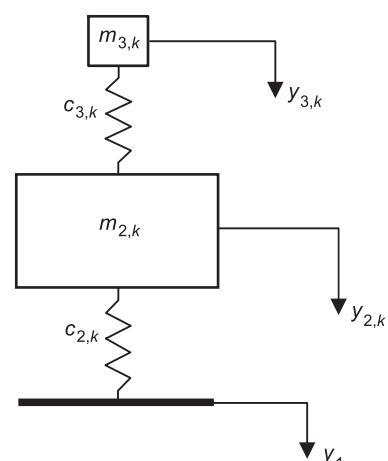


Рис. 3. Типовой элемент двухслойного континуального ДГК

Перемещения масс системы представим в виде

$$y_1(t) = a_1 \sin \theta t; \quad y_{j,k}(t) = a_{j,k} \sin \theta t; \quad j=1,3, \quad (2)$$

где  $a_1, a_{j,k}$  — амплитуды колебаний защищаемой конструкции и масс гасителя.

Подставляя (2) в (1), после несложных преобразований получим

$$a_{2,k} = \frac{f_{2,k}(f_{3,k} - v^2)}{(f_{2,k} + a_k f_{3,k} - v^2)(f_{3,k} - v^2) - a_k f_{3,k}^2} a_1, \quad (3)$$

где введены безразмерные параметры

$$v = \frac{\theta}{\omega_0}; \quad f_{j,k} = \frac{c_{j,k}}{m_{j,k}\omega_0^2}; \quad \alpha_k = \frac{m_{3,k}}{m_{2,k}}; \quad \omega_0^2 = \frac{c_1}{m_1}.$$

Предположим, что массы  $m_{2,k}$  весьма малы по сравнению с главной массой  $m_1$  и введем вместо параметров  $c_{2,k}, m_{2,k}$  их вариации  $\Delta c_{2,k}, \Delta m_{2,k}$ . В этом случае для реакции, действующей со стороны одного типового элемента на массу  $m_1$ , имеем

$$R(t) = \Delta c_2 [y_2(t) - y_1(t)] = \Delta c_2 \left[ \frac{f_2(f_3 - v^2)}{(f_2 + \alpha f_3 - v^2)(f_3 - v^2) - \alpha f_3^2} - 1 \right] y_1(t), \quad (4)$$

где для простоты записи индекс  $k$  опущен.

При бесконечно большом числе присоединенных элементов получим гаситель с непрерывно изменяющейся («размазанной») частотной характеристикой.

Интегрируя (4) по области изменения параметра настройки основного звена гасителя и заменяя  $\Delta c_2$  и  $\Delta m_2$  дифференциалами  $dc_2$  и  $dm_2$ , определим реакцию  $\bar{R}$  всего пакета на защищаемую конструкцию

$$\bar{R}(t) = \int_{f_h}^{f_k} R(t) df, \quad (5)$$

где  $f_h, f_k$  — величины, соответствующие началу и концу интервала изменения частотной настройки.

Множитель перед скобкой в (4) представим в виде

$$\Delta c_2 = m_0 \omega_0^2 f_2, \quad (6)$$

предполагая, что внутри интервала интегрирования основная масса  $m_2$  гасителя равномерно распределена с интенсивностью  $m_0$

$$m_0 = \frac{m_2}{f_k - f_h}. \quad (7)$$

С учетом (5)–(7) найдем

$$\bar{R}(t) = -m_2 \omega_0^2 y_1(t) \frac{1}{f_k - f_h} \int_{f_h}^{f_k} \left[ \frac{f_2(f_3 - v^2)}{(f_2 + \alpha f_3 - v^2)(f_3 - v^2) - \alpha f_3^2} - 1 \right] df. \quad (8)$$

Полученное выражение можно преобразовать к виду

$$\bar{R}(t) = -m_2 \omega_0^2 y_1(t) \frac{1}{f_k - f_h} \int_{f_h}^{f_k} \left[ \frac{f_2(nf_2 - v^2)}{nf_2^2 - v^2 f_2 [1 + n(1+a)] + v^4} - 1 \right] df_2, \quad (8)$$

где  $n = f_3/f_2$ .

Вычисление интеграла в (8) может быть выполнено аналитически. С этой целью представим его в виде суммы трех интегралов:

$$\begin{aligned} \bar{R}(t) = & -m_2 \omega_0^2 y_1(t) \frac{1}{f_k - f_h} \left\{ \int_{f_h}^{f_k} \left[ \frac{nf_2^2}{nf_2^2 - v^2 f_2 [1 + n(1+a)] + v^4} \right] df_2 - \right. \\ & \left. - \int_{f_h}^{f_k} \left[ \frac{f_2 v^2}{nf_2^2 - v^2 f_2 [1 + n(1+a)] + v^4} \right] df_2 - \int_{f_h}^{f_k} df_2 \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

Для выполнения вычислений в (9) воспользуемся табличными интегралами [10] вида

$$\int \frac{x^k}{ax^2 + bx + c} dx \quad \text{при } k = 0, 1, 2.$$

В результате получим:

$$\bar{R}(t) = -m_1 \omega_0^2 I_0 y_1(t), \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} I_0 = & [nI_1 - v^2 I_2 - (f_k - f_h)] / (f_k - f_h); \\ I_1 = & \frac{f_k - f_h}{a} - \frac{b}{2a} \ln \left| \frac{af_k^2 + bf_k + c}{af_h^2 + bf_h + c} \right| + \frac{b - 2ac}{2a^2 \sqrt{b^2 - 4ac}} \times \\ & \times \ln \left[ \frac{2af_k + b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2af_k + b + \sqrt{b^2 - 4ac}} \middle| \frac{2af_h + b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2af_h + b - \sqrt{b^2 - 4ac}} \right]; \\ I_2 = & \frac{1}{2a} \ln \left| \frac{af_k^2 + bf_k + c}{af_h^2 + bf_h + c} \right| - \frac{b}{2a^2 \sqrt{b^2 - 4ac}} \times \\ & \times \ln \left[ \frac{2af_k + b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2af_k + b + \sqrt{b^2 - 4ac}} \middle| \frac{2af_h + b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2af_h + b - \sqrt{b^2 - 4ac}} \right]; \end{aligned} \quad (11)$$

$$a = n; \quad b = -v^2 [1 + n(1+\alpha)]; \quad c = v^4.$$

Дифференциальное уравнение колебаний массы  $m_1$  с учетом присоединенного континуального гасителя имеет вид

$$-m_1 \ddot{y}_1(t) - c_1 y_1(t) + \bar{R}(t) + P_0 \exp(i\theta t) = 0. \quad (12)$$

Учитывая (10), из (12) получим формулу для определения перемещений массы защищаемой конструкции

$$a_1 = \frac{y_{1,\text{ст}}}{1 + \mu[nI_1 - v^2 I_2 - f_k + f_h]/(f_k - f_h) - v^2}, \quad (13)$$

где  $y_{1,\text{ст}} = P_0 / m_1 \omega_0^2$  — статическое перемещение массы защищаемой конструкции;  
 $\mu = m_2 / m_1$ ,  $m_2$  — суммарная масса звеньев гасителя.

Влияние диссипативных сил в связях системы учтем в соответствии с гипотезой частотно-независимого трения [11], введя комплексные жесткости

$$\bar{c}_1 = c_1(1 + i\gamma_1); \quad \bar{c}_{j,k} = c_{j,k}(1 + i\gamma_2),$$

где  $\gamma_1, \gamma_2$  — коэффициенты неупругого сопротивления в защищаемой конструкции и в звеньях гасителя соответственно.

При учете сил неупругого сопротивления некоторые входящие в формулы (11)–(13) величины становятся комплексными числами. Вычисление интегралов в этом случае не вызывает особых затруднений. Отметим, что для определения реакции пакета по формуле (8) могут быть использованы также методы численного интегрирования [10].

Некоторые результаты, полученные в соответствии с развиваемой методикой, приведены на рис. 4, где представлены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) колебаний массы защищаемой конструкции ( $A_1 = |a_1|/y_{1,\text{ст}}$ ), оборудованной континуальными ДГК. Кривые 1, 2 на рис. 4 получены для случая двухслойного континуального гасителя соответственно при  $\mu = 0,1$  и  $\mu = 0,05$ . Кривая 3 иллюстрирует эффективность

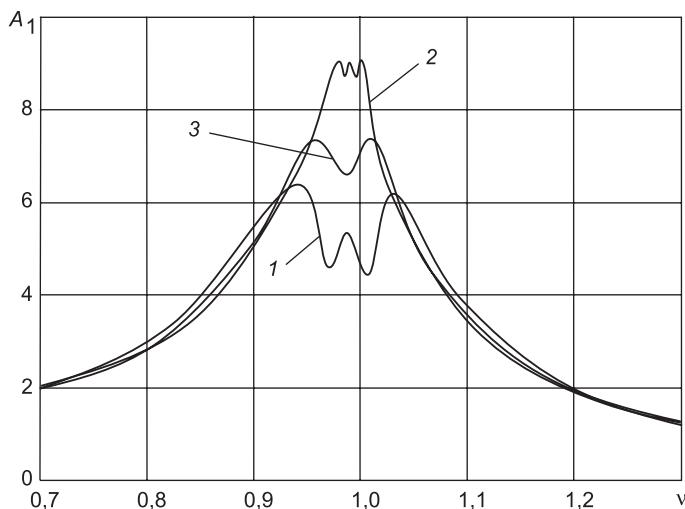


Рис. 4. АЧХ колебаний массы защищаемой конструкции, оборудованной континуальными ДГК

1 —  $\alpha = \alpha_k = 0,1$ ;  $n = 1,02$ ;  $\mu = 0,1$ ;  $f_h = 0,715$ ;  $f_k = 0,805$ ;  $\gamma_1 = 0$ ;  
 $\gamma_2 = 0,01$ ; 2 —  $\alpha = \alpha_k = 0,1$ ;  $n = 1,103$ ;  $\mu = 0,05$ ;  $f_h = 0,735$ ;  $f_k = 0,795$ ;  
 $\gamma_1 = 0$ ;  $\gamma_2 = 0,015$ ; 3 —  $\alpha = \alpha_k = 0$ ;  $n = 1,0$ ;  $\mu = 0,1$ ;  $f_h = 0,715$ ;  
 $f_k = 0,805$ ;  $\gamma_1 = 0$ ;  $\gamma_2 = 0,01$

однослойного континуального гасителя с относительной массой  $\mu = 0,1$ . Анализ кривых 1, 2 показывает, что величина суммарной относительной массы гасителя  $\mu$ , так же как и для дискретных моделей ДГК [1, 5], является одним из основных параметров, определяющих эффективность виброзащиты. Следует отметить, что в отличие от дискретных многомассовых ДГК, максимальная эффективность виброгашения с помощью континуальных гасителей достигается при очень малых значениях коэффициентов демпфирования в звеньях континуального гасителя:  $\gamma_2 = 0,01$ . Таким образом, приведенные на рис. 1, а, б демптирующие покрытия с малым рассеянием энергии в слоях при оптимально подобранных характеристиках способны обеспечить высокое демпфирование колебаний для тонкостенных конструкций с разреженным спектром собственных частот. Возможность использования однослойного континуального гасителя в качестве демпфера рассмотрена, в частности, в работе [5]. Вместе с тем в отличие от безынерционных демптирующих покрытий сдвигового типа [6–9], обеспечивающих почти одинаковую эффективность на всей частотной оси, рассматриваемое в [5] демптирующее покрытие проявляет частотную узкополосность, характерную для динамических гасителей колебаний. Как следует из сопоставления кривых 1, 3 на рис. 4, эффективность двухслойного континуального ДГК на 20 % выше эффективности однослойного гасителя.

Сравнение полученных результатов с аналогичными данными для дискретных моделей показывает, что эффективность гасителя с «размазанной» частотной характеристикой до 40 % ниже, что обусловлено снижением эффективной массы гасителя вследствие распределения ее по частотной оси. Такой гаситель обеспечивает высокое демпфирование при очень низком коэффициенте рассеяния энергии в упругих связях и, несмотря на некоторую частотную узкополосность, может рассматриваться как эффективное устройство для гашения колебаний тонкостенных конструкций, обладающих разреженным спектром собственных частот. Особенно эффективно применение континуальных гасителей рассматриваемого типа для обеспечения долговечности тонкостенных конструкций в условиях трещинообразования под действием циклических и ветровых нагрузок, нагрузок от поездов метрополитена и других.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дукарт, А.В. Оптимизация параметров и эффективность пакетных гасителей колебаний с многомассовыми типовыми элементами [Текст] / А.В. Дукарт, А.И. Олейник // Изв. вузов. Строительство. — 2002. — № 3. — С. 26–32.
2. Закиров, И.М. Экспериментальное исследование колебаний системы с группой динамических гасителей [Текст] / И.М. Закиров, Н.А. Пикулев // Строительная механика и расчет сооружений. — 1978. — № 1. — С. 61–63.
3. Пикулев, Н.А. К расчету группы виброгасителей на прочность и выносливость [Текст] / Н.А. Пикулев, А.З. Манапов // Строительная механика и расчет сооружений. — 1977. — № 2. — С. 33–35.
4. Карамышкин, В.В. Динамическое гашение колебаний [Текст] / В.В. Карамышкин. — Л. : Машиностроение, 1988. — 108 с.
5. Коренев, Б.Г. Динамические гасители колебаний: Теория и технические приложения [Текст] / Б.Г. Коренев, Л.М. Резников. — М. : Наука, 1988. — 304 с.

6. Дукарт, А.В. Об эффективности демпфирующего покрытия пластин, содержащего распределенные на внешней поверхности регулярные линзообразные включения [Текст] / А.В. Дукарт, А.И. Олейник // Вісник Дніпропетровського університету. Механіка. — 2003. — Вип. 7. — Т. 2. — С. 52–64.
7. Дукарт, А.В. О демпфирующих свойствах неоднородного покрытия с регулярными включениями [Текст] / А.В. Дукарт, А.И. Олейник // Изв. вузов. Строительство. — 2005. — № 6. — С. 4–11.
8. Nashif, A. Vibration damping [Текст] / A. Nashif, D. Johnes, J. Henderson. — New York : John Wiley& Sons, 1985. — 470 р.
9. Никифоров, А.С. Вибропоглощение на судах [Текст] / А.С. Никифоров. — Л. : Судостроение, 1979. — 184 с.
10. Прудников, А.П. Интегралы и ряды [Текст] / А.П. Прудников, Ю.Ф. Брычков, О.И. Марычев. — М. : Наука, 1981. — 800 с.
11. Сорокин, Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем [Текст] / Е.С. Сорокин. — М. : Стройиздат, 1960. — 131 с.

*ДУКАРТ Адам Вілебальдович, д-р техн. наук, проф.  
Московский государственный строительный университет  
ОЛЕЙНИК Александр Иванович, д-р техн. наук, доц.  
Рудненский индустриальный институт, Казахстан*

Получено 10.07.14

**Dukart Adam Vilebaldovich**, doctor of technical sciences, professor, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

**Oleinik Aleksandr Ivanovich**, doctor of technical sciences, assistant professor, Rudnii Industrial Institute, Kazakhstan

## BILAYER DISTRIBUTED VIBRATION ABSORBER

The dynamic absorber for damping vibrations of thin-walled structures is considered. It is formed of a large number of two-mass dampers with close frequencies, installed on a damped structure. In the limit case (i.e., for an infinite number of the dampers), it reduces to a continual two-layer absorber with continuously varying frequency responses. The method for calculation of the structure, simulated with one degree of freedom system, equipped with the proposed distributed absorber, under the disturbing harmonic load is proposed. Dynamic properties of the obtained vibration-proof system that are peculiar both to the inertial damping coatings and discrete absorbers, are analyzed. Oscillation amplitudes of the damped structure subject to excitation with varying frequency is evaluated.

**Key words:** protected structure, two-layer continuous absorber, harmonic load, frequency response, damping efficiency.

## REFERENCES

1. Dukart, A.V. Optimization of parameters and effectiveness of packing vibration damper with multimass typical elements [Text] / A.V. Dukart, A.I. Oleinik // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2002. — N 3. — P. 26–32.
2. Zakirov, I.M. Experimental study of vibrations of the system with a few dynamic absorbers [Text] / I.M. Zakirov, N.A. Pikulev // Stroitel'naya mechanika i raschet sooruzhenii. — 1978. — N 1. — P. 61–63.
3. Pikulev, N.A. On the calculation of a lot of vibration dampers for strength and endurance [Text] / N.A. Pikulev, A.Z. Manapov // Stroitel'naya mechanika i raschet sooruzhenii. — 1977. — N 2. — P. 33–35.
4. Karamyshev, V.V. Dynamic vibration damping [Text] / V.V. Karamyshev. — L. : Mashinostroenie, 1988. — 108 p.

5. Korenev, B.G. Dynamic vibration damper: Theory and engineering applications [Text] / B.G. Korenev, L.M. Reznikov. — M. : Nauka, 1988. — 304 p.
  6. Dukart, A.V. On the efficiency of the damping coating for plates containing regular lens-type indusions distributed on the outer surface [Text] / A.V. Dukart, A.I. Oleynik // Vesnik Dnepropetrovskogo universitetu. Mechanika. — 2003. — Vip. 7. — T. 2. — P. 52–64.
  7. Dukart, A.V. On damping properties of heterogeneous coating with regular engagements [Text] / A.V. Dukart, A.I. Oleinik // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2005. — N 6. — P. 4–11.
  8. Nashif, A. Vibration damping [Text] / A. Nashif, D. Johnes, J. Henderson. — New York : John Wiley&Sons, 1985. — 470 p.
  9. Nikiforov, A.S. Vibration absorption on ships [Text] / A.S. Nikiforov. — L. : Sudostroenie. — 1979. — 184 p.
  10. Prudnikov, A.P. Integrals and series [Text] / A.P. Prudnikov, Yu.F. Brychkov, O.I. Marychev. — M. : Nauka, 1981. — 800 p.
  11. Sorokin, E.S. On theory of internal friction under vibrations of elastic system [Text] / E.S. Sorokin. — M. : Stroyizdat, 1960. — 131 p.
-

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.175:678.04

В.П. СЕЛЯЕВ, Т.А. НИЗИНА, Д.Р. НИЗИН, Н.Е. ФОМИН, В.А. ЮДИН

### ВЛИЯНИЕ АЛИФАТИЧЕСКОГО РАЗБАВИТЕЛЯ ЭТАЛ-1 НА УПРУГОПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЩЕЛОЧЕСТОЙКОСТЬ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ

Представлены результаты экспериментальных исследований упругопрочностных характеристик и щелочестойкости эпоксидных композитов в зависимости от содержания активного разбавителя Этал-1. Выявлено оптимальное содержание Этал-1, позволяющее получать составы с требуемым комплексом свойств.

Ключевые слова: эпоксидные связующие, активный разбавитель, щелочестойкость.

В связи с постоянно усиливающимся негативным влиянием внешних агрессивных факторов для защиты строительных изделий и конструкций на основе цементных вяжущих все чаще используются защитные полимерные пропитки и покрытия [1–4]. Наибольшее агрессивное воздействие на бетоны, обладающие высоким водородным показателем (рН 12–13), оказывают растворы кислот. Поэтому большая часть исследований при разработке защитных покрытий, в том числе на основе эпоксидных связующих, посвящена оценке их кислотостойкости. В то же время эпоксидные композиты на основе традиционных отвердителей, как правило, обладают недостаточной стойкостью к продуктам гидратации бетона [1, 4], что требует при разработке защитных составов проведения дополнительных исследований на щелочестойкость.

Кроме того, при разработке составов защитных покрытий бетонных оснований особое внимание следует уделять обеспечению высокой адгезионной прочности наносимых покрытий к бетонным основаниям. Сила адгезионного сцепления полимерного покрытия с подложкой является важнейшей физико-химической характеристикой, определяющей долговечность строительных конструкций, эксплуатирующихся в условиях действия агрессивных сред. В результате взаимодействия химических реагентов с материалом в таких конструкциях происходят качественные и количественные изменения, которые зависят от характеристик материалов и особенностей действующей на них среды. Уже на стадии формирования адгезионного соединения возникают разнообразные дефекты — потенциальные очаги будущего разрушения. Ими могут быть различные загрязнения, оставшиеся на поверхности бетонного основания, не заполненные адгезивом углубления, воздушные включения, продукты, выделившиеся в процессе склеивания и скопившиеся на границе раздела, поры, оставшиеся после улетучивания растворителя, трещины, возникшие в процессе усадки.

---

© Селяев В.П., Низина Т.А., Низин Д.Р., Фомин Н.Е., Юдин В.А., 2014

Одной из основных характеристик полимерных покрытий, оказывающих наибольшее влияние на величину адгезионной прочности, является вязкость состава, обеспечивающая максимально возможную глубину пропитки бетонного основания, зависящую также от его поверхностной пористости. Повышение глубины проникновения полимерного композита в бетонную подложку позволяет сформировать переходный слой между основанием и покрытием, что приводит к образованию надежного адгезионного сцепления и, как следствие, повышению долговечности изделий и конструкций с полимерными покрытиями. Получаемые таким образом изделия, свойства которых по высоте поперечного сечения изменяются по определенному закону, можно отнести к функционально-градиентным.

В данной работе снижение вязкости полимерных композиций на основе широко применяемой в строительстве эпоксидной смолы ЭД-20 достигалось путем введения в состав алифатического разбавителя Этал-1, представляющего собой современный аналог традиционных разбавителей ДЭГ-1 и ТЭГ-1, в количестве 5, 10, 15, 20, 25 и 50 % от массы смоляной составляющей. В качестве отверждающей системы использовался отвердитель аминного типа Этал-45М. В сочетании со смолой ЭД-20 он обладает в 3 раза большей жизнеспособностью по сравнению с традиционным отвердителем полиэтиленполиамином, позволяет дополнительно снизить вязкость полимерного связующего при обеспечении достаточно высоких физико-механических характеристик готовых композитов.

Экспериментальные исследования упругопрочностных характеристик проводились на образцах-восьмерках, изготовленных согласно ГОСТ 11262-80 (тип 2). Для каждого состава параллельно изучалось не менее 6 образцов. В качестве исследуемых характеристик брались: предел прочности, модуль упругости и относительное удлинение при растяжении. Реологические характеристики полимерного связующего определялись с помощью вискозиметра В3-246 с диаметром отверстия 4 мм.

По результатам исследования установлено существенное снижение реологических параметров при введении в состав полимерного связующего активного разбавителя Этал-1 и отвердителя Этал-45М (рис. 1).



Рис. 1. Изменение реологических и прочностных характеристик эпоксидных композитов в зависимости от содержания активного разбавителя Этал-1

В зависимости от содержания Этал-1 (5–50 % от массы смоляной связующей) достигнуто снижение вязкости составов, соответственно, в 1,3–7,8 раза.

Известно, что введение в состав полимерных связующих растворителей и разбавителей, как правило, приводит к значительному снижению упругопрочностных характеристик. Исключение составляет использование нереакционноспособных разбавителей, проявляющих характер антипластификаторов — соединений, повышающих одновременно прочность и эластические характеристики полимерных композиций [3].

Анализ кривых деформирования эпоксидных композитов при растяжении (рис. 2) показал, что введение в состав до 50 % активного разбавителя приводит к снижению прочностных характеристик в 2,9 раза

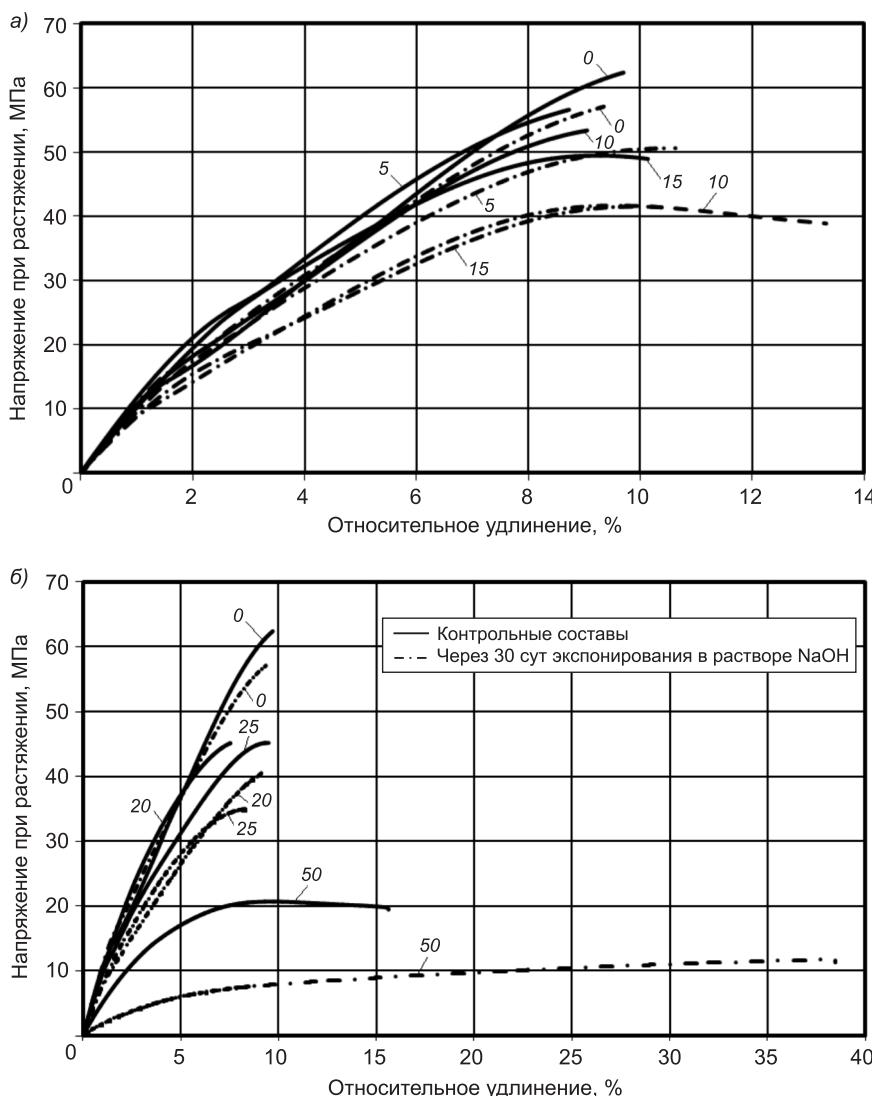


Рис. 2. Изменение кривых деформирования эпоксидных композитов при растяжении в зависимости от содержания активного разбавителя Этал-1 для контрольных составов и через 30 сут экспонирования в растворе NaOH с pH = 12,5  
а — 0, 5, 10 и 15 % от массы связующего; б — 0, 20, 25 и 50 % от массы связующего

(рис. 1), модуля упругости — в 2,3 раза. Результаты исследования упругопрочностных характеристик контрольных составов представлены в таблице.

Оценка щелочестойкости разработанных составов осуществлялась после экспонирования образцов в течение 30 сут в растворе NaOH с pH = 12,5. Для всех составов с содержанием исследуемого разбавителя до 25 % наблюдается снижение предела прочности при растяжении, не превышающее 20 % от первоначальной прочности (см. таблицу). Введение 50 % Этал-1 от массы смоляной части приводит к резкому снижению прочностных характеристик; относительная прочность к 30 сут экспонирования по сравнению с контрольным составом составляет 0,57.

Модуль упругости эпоксидных композитов, содержащих не более 25 % Этал-1, в растворе NaOH снижается до 10–17 % от первоначальных значений. Для состава с максимальным содержанием активного разбавителя относительный модуль упругости через 30 сут равен 0,45.

Анализ деформативных характеристик исследуемых композитов показал, что относительное удлинение при максимальной нагрузке для всех составов составляет 7–10 %. Экспонирование композитов с содержанием Этал-1 до 20 % в растворе NaOH приводит к увеличению относительного удлинения на 3–19 %. Для композита с 50%-м содержанием активного разбавителя через 30 сут выдержки в жидкой агрессивной среде зафиксировано резкое увеличение относительного удлинения при растяжении, составляющее 30,49 %.

Прирост массы образцов через 30 сут выдержки в растворе NaOH, повышающийся с увеличением содержания Этал-1 от 0 до 25 %, составляет от 0,56–0,95 %. Введение 50 % активного разбавителя приводит

#### **Результаты исследования составов эпоксидных покрытий**

Характеристика	Содержание активного разбавителя Этал-1, % от массы связующего						
	0	5	10	15	20	25	50

#### *Контрольные составы*

Предел прочности при растяжении, МПа	59,28	54,76	52,03	49,10	44,98	45,68	20,45
Модуль упругости при растяжении, МПа	636,3	593,9	568,7	557,8	211,1	519,1	279,8
Относительное удлинение при максимальной нагрузке, %	8,62	8,75	9,03	8,39	7,43	8,90	9,18

#### *Через 30 сут экспонирования в растворе NaOH с pH = 12,5\**

Предел прочности при растяжении, МПа	56,30 0,95	51,88 0,95	42,05 0,81	41,37 0,84	40,29 0,90	36,54 0,80	11,59 0,57
Модуль упругости при растяжении, МПа	579,4 0,91	532,8 0,90	482,9 0,85	468,8 0,84	454,86 0,89	432,3 0,83	126,46 0,45
Относительное удлинение при максимальной нагрузке, %	9,23 1,07	9,46 1,08	9,27 1,03	8,67 1,03	8,82 1,19	8,04 0,90	30,49 3,32
Прирост массы, %	0,56	0,62	0,83	0,86	0,92	0,95	1,91

\* В числителе приведены абсолютные значения, в знаменателе — относительные.

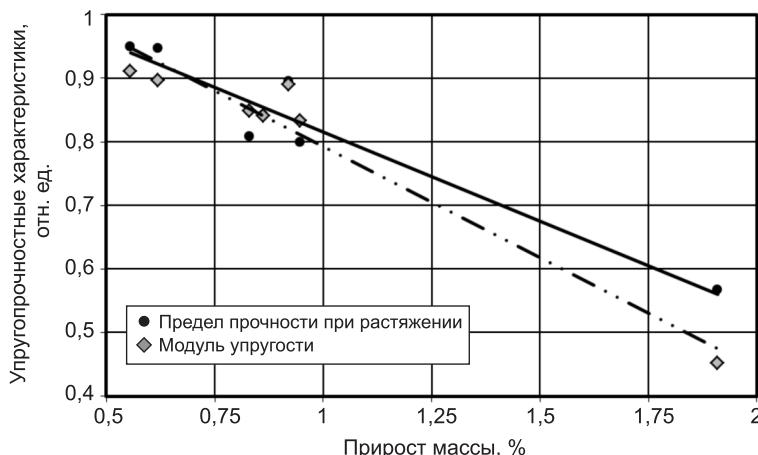


Рис. 3. Корреляционная зависимость между упругопрочностными и сорбционными характеристиками эпоксидных композитов через 30 сут экспонирования в растворе NaOH с pH = 12,5

к увеличению сорбционной способности почти в 3,5 раза по сравнению с немодифицированным составом, что свидетельствует о формировании более пористой структуры. Из анализа корреляционных зависимостей, представленных на рис. 3, видно, что чем меньшее количество раствора щелочи продиффундировало в образец, тем выше химическая стойкость эпоксидных композитов.

Анализ результатов исследований показал, что составы эпоксидных композитов с содержанием от 10 до 25 % активного разбавителя Этал-1 от массы смоляной части обладают требуемой подвижностью, высокими упругопрочностными характеристиками и стойкостью в растворе щелочи с pH = 12,5, что позволяет использовать их в качестве покрытий и пропиток бетонных оснований.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Соломатов, В.И. Химическое сопротивление материалов [Текст] / В.И. Соломатов, В.П. Селяев, Ю.А. Соколова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М., 2001. — 384 с.
- Чернин, И.З. Эпоксидные полимеры и композиции [Текст] / И.З. Чернин, Ф.М. Смехов, Ю.В. Жердев. — М. : Химия, 1982. — 232 с.
- Хозин, В.Г. Усиление эпоксидных полимеров [Текст] / В.Г. Хозин. — Казань : Изд-во ПИК «Дом печати», 2004. — 446 с.
- Низина, Т.А. Защитно-декоративные покрытия на основе эпоксидных и акриловых связующих [Текст] / Т.А. Низина. — Саранск : Изд-во Морд. ун-та, 2007. — 260 с.

СЕЛЯЕВ Владимир Павлович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.  
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск  
НИЗИНА Татьяна Анатольевна, д-р техн. наук, доц.

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск  
НИЗИН Дмитрий Рудольфович, асп.

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск  
ФОМИН Николай Егорович, канд. физ.-мат. наук, проф.

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск  
ЮДИН Вячеслав Александрович, канд. физ.-мат. наук, доц.

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Получено 07.07.14

**Selyaev Vladimir Pavlovich**, academician of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, doctor of technical sciences, professor, N.P. Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

**Nizina Tatyana Anatolyevna**, doctor of technical sciences, assistant professor, N.P. Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

**Nizin Dmitry Rudolfovich**, post-graduate student, N.P. Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

**Fomin Nikolay Egorovich**, candidate of physical and mathematical sciences, professor, N.P. Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

**Yudin Vyacheslav Alexandrovich**, candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor, N.P. Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

## **THE INFLUENCE OF ALIPHATIC THINNER ETAL-1 ON THE ELASTIC-STRENGTH PROPERTIES AND ALKALI RESISTANCE OF EPOXY COMPOSITES**

Shows the results of experimental researches elastic-strength characteristics and alkali resistance of epoxy composites, depending on the content of the active thinner Etal-1. Revealed the optimal content of Etal-1, allows to obtain compositions with the required combination of properties.

**Key words:** epoxy binders, reactive thinner, alkali resistance.

### **REFERENCES**

1. Solomatov, V.I. Chemical resistance of materials [Text] / V.I. Solomatov, V.P. Selyaev, Yu.A. Sokolova. — 2nd ed., rev. and ext. — M., 2001. — 384 p.
  2. Chernin, I.Z. Epoxy resins and compositions [Text] / I.Z. Chernin, F.M. Smekhov, Yu.V. Zherdev. — M. : Chimiya, 1982. — 232 p.
  3. Hozin, V.G. Strengthening of epoxy polymers [Text] / V.G. Hozin. — Kazan : Publisher PIC «Printing House», 2004. — 446 p.
  4. Nizina, T.A. Protective and decorative coatings based on epoxy and acrylic binders [Text] / T.A. Nizina. — Saransk : Mordovian University Press, 2007. — 260 p.
-

**УДК 691.327:539.432**

**Ю.Ю. ГАЛКИН, Г.Н. ПШЕНИЧНЫЙ**

## **О ХИМИЧЕСКОМ АСПЕКТЕ ПОЛЗУЧЕСТИ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ**

Рассмотрены гипотезы, касающиеся механизма ползучести цементных бетонов, общим принципом которых является физико-механический подход. На основе проведенного анализа в области твердения цементных систем, строения и свойств цементного камня (бетонов) сделан вывод о существенной роли в деформации ползучести химических преобразований.

**Ключевые слова:** гидратация цемента, стадийность процесса, микробетон, ползучесть, остаточные поверхностно-активные зоны.

Одним из сопутствующих процессов, протекающих в твердеющем бетоне и несущих железобетонных конструкциях в эксплуатационный период, является ползучесть — пластическое необратимое деформирование композита приложении сжимающей нагрузки. Развивающаяся деформация — одна из причин трещинообразования изделий и конструкций, потери усилий натяжения в предварительно напряженном железобетоне, увеличения максимального прогиба пролетных элементов. Негативные последствия и непредсказуемость деформации ползучести могут привести (и приводят!) к надвигающейся угрозе аварийной ситуации. Стало, к примеру, порочной практикой повсеместное усиление колонн монолитных многоэтажных зданий обоймами из силового проката. В этой связи очевидна актуальность уточнения физической сущности ползучести бетонов, что позволит обосновать соответствующие технологические режимы для повышения надежности зданий и сооружений.

Впервые явление неупругой длительной деформации цементного бетона при нагружении установил Е. Фрейсине (1938 г.). По его воззрениям, бетон — капиллярно-пористый материал, состоящий из твердого скелета и пор, заполненных водой и воздухом. Процесс представлялся как вязкое перемещение под нагрузкой воды по тонким капиллярам и капиллярная усадка, вследствие нарушения гигрометрического равновесия с окружающей средой. Однако данную гипотезу вряд ли можно признать исчерпывающей, поскольку она не объясняет ползучесть в водной среде, когда влияние капиллярных сил минимально, а также протекание необратимых деформаций при изгибе, кручении, растяжении, сдвиге и т.п., при которых сомнительна роль силового отжатия воды.

Ряд исследователей (Р.Е. и Г.Е. Дэвис, С.В. Александровский, Р. Лермит, Т.С. Пауэрс, У. Гансен, З.П. Базант, А.М. Невилль, Р.Ф. Фельдман) определяющим явлением в деформативных свойствах считали механическое отжатие адсорбированной на поверхностях частиц цемента и новообразований воды, а также кристаллизационной (межслоевой) воды в результате силового воздействия. Отдельные положения этой гипотезы имеют сходство с представлениями Е. Фрейсине. Отметим, что строение цементного камня

на тот момент представлялось как сочетание образующих жесткий каркас волокнистых гидросиликатов и продуктов гидратации в виде пластинок, содержащих основную часть адсорбционно-связанной воды (так называемую «гелевую» составляющую). Ползучесть объяснялась податливостью частиц геля под нагрузкой, их смещением на границе контакта, т.е. основной причиной ползучести называлось вязкое течение частиц (кристалликов), соединенных друг с другом коагуляционными контактами (рис. 1).

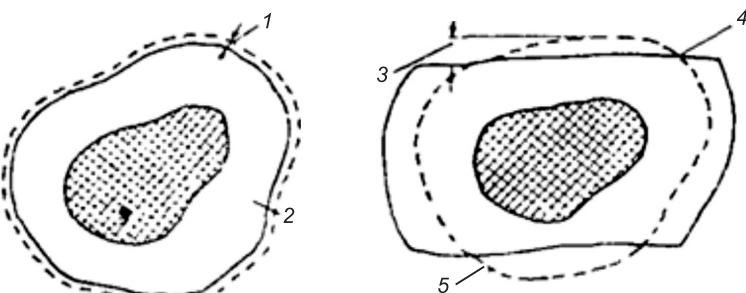


Рис. 1. Схема развития деформаций усадки и ползучести бетона при сжатии [1]

1 — мера усадки; 2 — слой геля после усадки; 3 — мера ползучести; 4 — новая поверхность после ползучести; 5 — до нагрузки

Данная позиция не объясняет причин затухания деформаций, стабильности структуры и прочностных свойств цементного камня в условиях неизбежного нарушения сплошности смещающимися отмеченными структурными элементами. Эта гипотеза также не согласуется с известными фактами ползучести предварительно высущенных образцов (когда удалена свободная и физически связанная вода), а также длительными деформациями, интенсивность которых увеличивается с ростом влажности окружающей среды.

В отечественном бетоноведении широко распространена гипотеза А.Е. Шейкина [2], рассматривающая ползучесть как результат перераспределения усилий между компонентами цементного камня (микробетона по В.Н. Юнгу), содержащего, по мнению автора, следующие структурные составляющие (рис. 2):

1) кристаллический сросток, сформированный сросшимися кристаллогидратами — продуктами гидратации цемента (гидроалюминатами и гидроферритами кальция, известью, этtringитом и др.);

2) наполняющий сросток тоберморитовый гель, представляющий собой взвесь субмикроскопи-

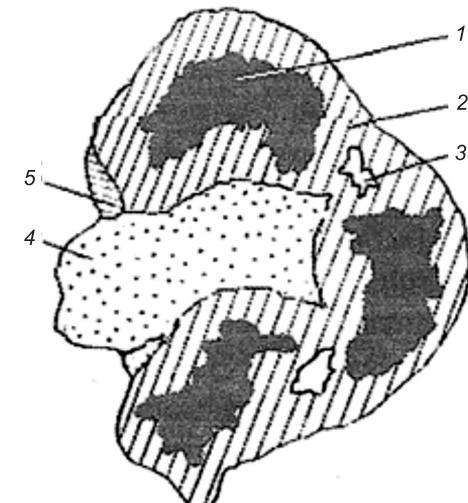


Рис. 2. Фрагмент кристаллизационно-коагуляционной структуры цементного камня [3]

1 — цементное ядро; 2 — кристаллогидратные образования; 3 — микропоры; 4 — включения гелевых структур; 5 — жидкая фаза

ческих кристаллов гидросиликатов кальция с адсорбционно-связанной водой;

3) не полностью гидратированные цементные зерна (так называемые «ядра»), являющиеся балластом, переставшим играть активную роль в химизме процесса и твердении;

4) сообщающиеся поры, капилляры, микротрешины, межзерновые пустоты различных размеров и конфигураций с адсорбционно-связанной и свободной (гравитационной) водой.

Таким образом, на начальном этапе усилие воспринимается как кристаллическим сростком, так и тоберморитовым гелем. Небольшая же энергия связи в коагуляционных (гелевых) контактах по сравнению с кристаллизационными (химическими) сшивками «сростка» приводит к тому, что по мере повышения внешней нагрузки, возникновения механического напряжения и тепловых флюктуаций происходит постепенное разрушение гелевых структур. В результате вязкого течения гель разгружается, а кристаллический каркас с «несущими» не нарушенными контактами геля гидросиликатами кальция воспринимает на себя дополнительные усилия. Деформирование геля релаксирует внутренние напряжения, и деформация ползучести носит затухающий характер.

Если движущая сила процесса (по А.Е. Шейкину) заключается в течении тоберморитового геля и передаче усилий на неподвижный жесткий каркас кристаллогидратов, то ряд исследователей (А.К. Малмейстер, И.И. Улицкий, Я.В. Столяров и др.) определяющим фактором в механизме ползучести рассматривают пластическую деформацию не гелевой, а кристаллической составляющей цементного камня. Имеются опытные данные по пропитке нагружаемых образцов неполярным керосином, когда смазочное действие вещества в структуре цементного камня должно облегчить межплоскостное скольжение кристаллической структуры. Однако полученный результат не подтвердил данную точку зрения — ползучесть таких образцов едва наблюдалась даже при высоких уровнях напряжения.

Популярна гипотеза о том, что причина ползучести — возникновение и развитие в структуре цементного камня микротрешин (О.Я. Берг, А.В. Саталкин, З.Н. Цилосани, Д.Е. Чоговадзе, Г. Рюш, Глюклих, А.В. Яшин, К.Г. Красильников, С.Н. Журков, Б.Н. Нурузлаев), которые затем переходят в макротрешины, обусловливая протекание деформативных процессов. Элементарный акт остаточной деформации — разрыв межатомных связей — приводит к возникновению субмикротрешин, перерастающих по мере их накопления в микро- и макротрешины.

На современном этапе развития бетоноведения в описание явления ползучести ничего кардинально нового привнесено не было. В результате изучения частиц бетона наnanoуровне Ф. Ульм и М. Вандамм [4] объясняют причину ползучести как результат перераспределения наноразмерных частиц гидросиликата кальция (C-S-H), которые меняют плотность своей упаковки — в одних местах на большую, в других на меньшую. Изменение плотности, а также локальное уплотнение структуры отмечалось ранее О.Я. Бергом при исследовании прохождения ультразвуковых импульсов через твердеющий и находящийся под нагрузкой цементный камень.

Исходя из основных принципов рассмотренных гипотез, ползучесть представляется как негативное явление, сопровождаемое трещинообразованием и неизбежным снижением прочностных показателей. Однако при напряжениях ниже разрушающих эта деструкция мало того что не наблюдается, а даже наоборот — обширный ряд экспериментальных работ свидетельствует об улучшении эксплуатационных качеств (прочности при изгибе и сжатии, модуля упругости), например, при раннем нагружении цементных бетонов.

При всем многообразии взглядов ползучесть связывается с протеканием исключительно физико-механических явлений (усадки, деформирования, уплотнения, силового отжатия воды, перераспределения напряжений, микротрещинообразования и т.п.), и совершенно не рассматривается возможность химических преобразований в условиях силовых воздействий. Реальность же химической стороны проблемы подтверждается энергетическими расчетами (Р.Л. Дей) и опытным путем (А. Бентур, Н.Б. Милстон, Дж.Ф. Джоун). В последнем случае методом адсорбции азота показано увеличение на 10–20 % площади поверхности цементного камня после деформации ползучести, что можно объяснить не чем иным, как появлением в условиях внешнего давления дополнительной порции гидратированных продуктов.

В то же время, отсутствие достаточной ясности в механизме ползучести — частный случай, являющийся следствием основополагающей, имеющей хронический характер проблемы, — проблемы превращения пластичной цементной массы в камень. Не секрет, что используемая трехстадийная схема твердения цемента и материалов на его основе не отражает в должной степени процесс, подтверждением чему является масса не решенных вопросов. Не понятна причина избирательного растворения цементных минералов, сопровождающаяся выходом в поровую жидкость преимущественно ионов кальция (К. Дорш, Г.Н. Сиверцев, Ю.С. Малинин). К аномалии, зачастую, относят давно известные скачкообразность отвердевания (В.А. Кинд, В.Ф. Журавлев), пилообразный рост и сбросы прочности бетонов на поздних этапах (Ю.С. Малинин, Л.А. Малинина, С.А. Миронов, В.Н. Малинский). Популярно стремление к предельно полному превращению цементных зерен в гидратированные соединения, что недостижимо в условиях формирования экранной оболочки новообразований с ничтожной и практически постоянной при любых условиях и этапах твердения толщиной. Все это затрудняет описание процесса твердения и морфологических особенностей конечного продукта, представление действия различных (в том числе силовых) факторов, обоснование рациональных технологических режимов, обеспечивающих повышенную эксплуатационную надежность бетона и железобетона.

Взаимодействие гетерогенной цементной системы имеет поверхностный характер, предусматривающий переход из исходного в гидратированный вид через стадию формирования и развития на границе раздела фаз переходного активированного комплекса, что полностью отвечает фундаментальному положению химической кинетики гетерогенных реакций. Этот комплекс представляет собой определенным образом рассредоточенные на клинкерной поверхности шаровые полимолекулярные струк-

туры диаметром до 0,5 мкм (впервые обнаруженные американскими исследователями в середине XX столетия), неравновесность которых определяется динамизмом адсорбированных диполей и наличием под дипольными сводами огромного количества энергетически ненасыщенных активных центров (связей ионов кальция) твердой фазы. Развитие переходных структур идет по пути эстафетного ослабления и разрушения сетки Н-связей, постепенной концентрации диполей у адсорбционных центров, возмущения, достижения критического уровня, распада системы, появления активных элементов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $(\text{SiO}_4)^{4-}$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{OH}^-$  и др.) и их быстротечного взаимодействия. Процесс протекает стадийно, «скачкообразно» с  $90 \pm 10$ -минутными индукционными (подготовительными) интервалами в начальные часы обычного твердения, превращающимися со временем (по мере снижения количества активной воды, повышения энергии связи диполей) в часы, сутки, месяцы...

Стадийность гидратационного процесса приводит к последовательному уменьшению диаметра шатровых комплексов, заполнению поверхности клинкерных зерен kleящим материалом — гидросиликатом. На поздних этапах в гидросиликатной массе формируются локально распределенные поверхностно-активные зоны (включающие остаточные активные центры и адсорбированные диполи), которые легко обнаруживаются электронной микроскопией в виде сферических пор и цилиндрических каналов диаметром 0,1–0,3 мкм (рис. 3). Эти зоны относительно равновесны, сохраняются в цементном композите неопределенно продолжительное время, являются объектами естественной поздней гидратации с неизбежным возникновением внутренних структурных напряжений и временным (при благоприятном стечении обстоятельств) сбросом прочности [5].

Затвердевший цементный камень (бетон, железобетон), таким образом, не есть нечто замершее, неизменное и стабильное во времени. Это — сложная, постоянно меняющаяся энергетическая система, обладающая адаптационной способностью. Многие внешние (термохимические, электрофизические, вибрационные, в том числе силовые) воздействия способны активировать адсорбционно-связанную воду, нарушить

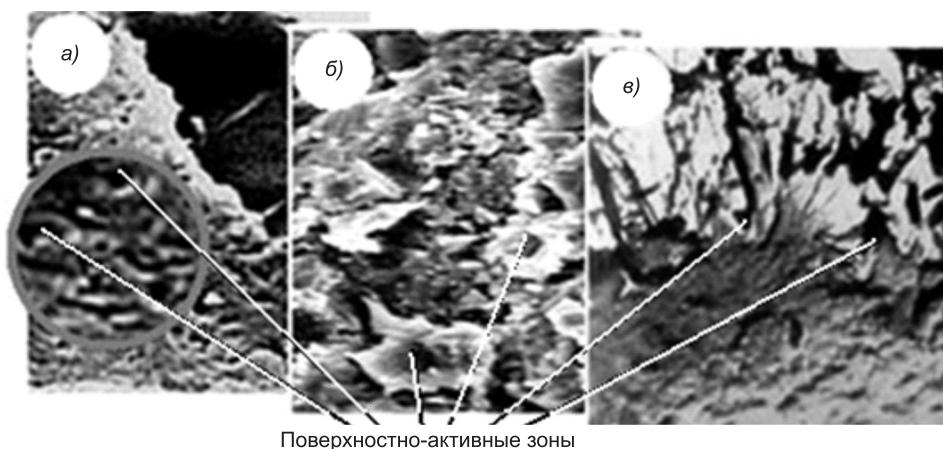


Рис. 3. Фрагменты механически не поврежденной (а) и разрушенной (б, в) гидратной оболочки цементных частиц [2]

равновесие поверхностно-активных зон, спровоцировать одновременную гидратацию цементных минералов на подавляющем большинстве зерен со сложно прогнозируемым результатом. Следовательно, в деформативных свойствах бетонов определяющая роль принадлежит не вышеотмеченным физико-механическим явлениям, а химическому аспекту. Появляющийся в условиях нагружения гидратный продукт залечивает микродефекты и не только возвращает, но и нередко приумножает композиту его прочностные позиции.

**Выводы.** 1. Физико-механические представления деформативных свойств цементных бетонов не раскрывают в должной мере всего спектра явления ползучести, о чем свидетельствует противоречивость многих экспериментальных данных, появление новых сложно разрешимых вопросов. Основной недостаток этих гипотез (и это давно отмечалось) — отсутствие химической составляющей, которую, в свою очередь, весьма проблематично обосновать с позиций существующей трехстадийной схемы гидратации цементных минералов, структурообразования и упрочнения цементного камня (бетона).

2. Выявление физической сущности ползучести и иных накопившихся в строительном бетоноведении проблем должно базироваться не на сквозьрастворных (криSTALLИЗАционных) принципах, а на основе электроповерхностных гидратационных преобразований системы «цемент — вода». Гидратация и твердение цемента протекают путем стадийного формирования в межфазной зоне, развития (аккумулирования собственной энергии), достижения критического уровня и распада (появления активных элементов) переходных комплексов, что является фундаментальной позицией кинетики гетерогенных реакций.

3. Стадийно образующиеся энергетические комплексы представляют собой адсорбированные на клинкерной подложке полимолекулярные пористые (шатровые) водные структуры диаметром до 0,5 мкм, неравновесность которых определяется динанизмом диполей и наличием под их сводами энергетически ненасыщенных активных центров — связей ионов кальция. Процесс твердения заключается в последовательном связывании воды цементными минералами, снижении диаметра шатровых композиций, заполнении их оснований аморфным гидросиликатом.

4. Как следствие предыдущей позиции, происходит формирование в гидросиликатной массе остаточных относительно равновесных поверхностно-активных зон диаметром 0,1–0,3 мкм с адсорбционно-связанной водой, играющих сложно прогнозируемую роль в эксплуатационный период. Непрекращающаяся ни на мгновение «энергетическая живучесть» микробетона приводит к периодическим гидратационным явлениям на поздних этапах; образующийся при этом с увеличением объема твердой фазы гидрат служит источником внутренних напряжений и причиной сброса прочности бетонов.

5. Остаточные поверхностно-активные зоны чрезвычайно чувствительны к внешним, в том числе силовым, воздействиям. Нагружение микробетона (бетона в целом) деформирует структуру, активирует адсорбционно-связанную воду, провоцирует гидратационный процесс. Ослабление при этом межзерновых связей есть основная причина пластического (необратимого) деформирования композита. Появляющийся гидратный

продукт при благоприятном стечении обстоятельств залечивает микротрещины и возвращает бетону исходные или даже повышенные прочностные показатели.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берг, О.Я. Физические основы теории прочности бетона [Текст] / О.Я. Берг. — М. : Стройиздат, 1962. — 96 с.
2. Шейкин, А.Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня [Текст] / А.Е. Шейкин. — М. : Стройиздат, 1974. — 191 с.
3. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона [Текст] / И.Н. Ахвердов. — М. : Стройиздат, 1981. — 464 с.
4. Vandamme, M. Nanogranular origin of concrete creep [Текст] / M. Vandamme, F. Ulm // PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences). — 2009. — Vol. 106, N 26. — P. 10552–10557.
5. Пшеничный, Г.Н. Электрохимическая схема твердения портландцемента [Текст] / Г.Н. Пшеничный // Бетон и железобетон. — 2009. — № 1. — С. 27–30.

*ГАЛКИН Юрий Юрьевич, асп.*

*Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар  
ПШЕНИЧНЫЙ Геннадий Никифорович, канд. техн. наук, доц.*

*Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар*

Получено 07.07.14

**Galkin Yuriy Jur'yevich**, post-graduate student, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

**Pshenichnyy Gennadiy Nikiforovich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

## ABOUT THE CHEMICAL ASPECTS OF CEMENT CONCRETE CREEP

The existing hypotheses on the mechanism of creep of cement concrete, the general principle is the physical-mechanical approach. Based on the analysis of the hardening cement systems, structure and properties of cement stone (concrete) concluded a significant role in the creep deformation of chemical transformations.

**Key words:** cement hydration, the staging process, microconcrete, creep, residual surface-active zone.

## REFERENCES

1. Berg, O.Ya. Physical basis of the theory of strength of concrete [Text] / O.Ya. Berg. — M. : Stroyizdat, 1962. — 96 p.
2. Shakin, A.E. Structure, strength and fracture toughness of cement paste [Text] / A.E. Shakin. — M. : Stroyizdat, 1974. — 191 p.
3. Akhverdov, I.N. Fundamentals of physics concrete [Text] / I.N. Akhverdov. — M. : Stroyizdat, 1981. — 464 p.
4. Vandamme, M. Nanogranular origin of concrete creep [Text] / M. Vandamme, F. Ulm // PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences). — 2009. — Vol. 106, N 26. — P. 10552–10557.
5. Pshenichnyy, G.N. Electrochemical circuit hardening portland cement [Text] / G.N. Pshenichnyy // Concrete and reinforced concrete. — 2009. — N 1. — P. 27–30.

**УДК 691.327:666.973.6**

**М.А. РАКОВ, Г.И. БЕРДОВ, Л.В. ИЛЬИНА**

## **ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ГАЗОБЕТОНА ВВЕДЕНИЕМ ДИСПЕРСНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК И ЭЛЕКТРОЛИТОВ**

Совместное введение в газобетонную смесь дисперсных армирующих добавок (волластонит, диопсид) и электролитов с многозарядными катионами и анионами ( $1\% \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  и  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) обеспечивает повышение прочности газобетона на 30–75 %. В качестве вяжущего целесообразно использовать клинкер, измельченный совместно с песком и минеральными добавками, что позволяет повысить прочность газобетона на 65 % по сравнению с применением портландцемента.

**Ключевые слова:** газобетон, портландцемент, клинкер, прочность, плотность, дисперсные минеральные добавки, электролиты.

Для повышения прочности цементного камня и материалов на основе портландцемента широко используется введение минеральных добавок, например, микрокремнезема, золы-уноса, диопсида и т.д. Это позволяет в значительной мере реализовать потенциальные возможности портландцемента. Во многих случаях введение добавок обеспечивает сокращение расхода дорогостоящих вяжущих веществ. В связи с введением в действие измененных нормативов по теплозащите зданий, предусматривающих приближение к нормам европейских стран, возникла необходимость в улучшении имеющихся и создании новых стекловых материалов, отвечающих этим требованиям. К наиболее эффективным материалам относятся ячеистые бетоны неавтоклавного твердения, которые обладают низким коэффициентом теплопроводности и изготавливаются из доступного исходного сырья.

Характерной особенностью процесса структурообразования газобетонной смеси на природном песке с удельной поверхностью  $9,4 \text{ м}^2/\text{кг}$  является осадка массы через 2–2,5 ч на 4,5–6,5 %. Средняя плотность получаемого газобетона на песке естественной гранулометрии составляет  $1140$ – $1170 \text{ кг}/\text{м}^3$  и снижается с увеличением удельной поверхности песка [1]. Для получения газобетона со средней плотностью  $400$ – $500 \text{ кг}/\text{м}^3$  необходимо использование кварцевого песка с удельной поверхностью  $250$ – $300 \text{ м}^2/\text{кг}$  (удельная поверхность немолотого песка —  $3$ – $19 \text{ м}^2/\text{кг}$ ). Вместе с тем вопрос совместного помола клинкера с песком изучен недостаточно.

В данной работе исследовалось влияние дисперсных минеральных добавок и электролитов, а также совместного помола портландцементного клинкера, песка и минеральной добавки до удельной поверхности  $280$ – $300 \text{ м}^2/\text{кг}$  на прочность и плотность газобетона.

В качестве вяжущего изучен портландцементный клинкер производства ОАО «Искитимцемент» (Новосибирская область), используемый при производстве портландцемента марки ПЦ 400 Д-20. Минералогиче-

ский состав его, мас. %:  $C_3S$  — 60–62,  $C_2S$  — 15–17,  $C_3A$  — 5–7,  $C_4AF$  — 14. Клинкер хранился в виде гранул размером 5–20 мм.

Портландцементный клинкер исследован после хранения в течение 7 сут в стандартных условиях (температура  $20 \pm 2$  °C, влажность не более 60 %) и 12 мес во влажных условиях (влажность 80–85 %).

В качестве минеральных добавок использовали измельченные горные породы: волластонит (Синюхинское месторождение, рудник «Веселый», Республика Алтай), диопсид (Буготакское месторождение, Иркутская область), являющиеся отходами производства. Их химический состав приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав минеральных добавок

Добавка	Содержание оксидов, мас. %								
	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	п.п.п
Волластонит	53,4	34,7	0,3	3,1	2,4	—	—	—	6,1
Диопсид	56,1	25,4	15,8	1,0	0,7	0,1	0,1	0,1	0,6

Истинная плотность (кг/м<sup>3</sup>) данных добавок составляла: волластонит — 2915, диопсид — 3300. Волластонит и диопсид являются природными силикатами кальция, сложенными кремнекислородными тетраэдрами, как и основные клинкерные минералы — алит и белит. Эти добавки могут служить подложками для кристаллизации гидратных новообразований. Они имеют игольчатое строение кристаллов, обладают высокой твердостью. Их введение способствует микроармированию цементного камня и перераспределению напряжений в нем при действии внешней нагрузки. Добавку волластонита вводили в количестве 7 %, диопсида — 5 % от массы клинкера. Такое их содержание, как показали предыдущие эксперименты, близко к оптимальному значению [2].

В качестве добавленного электролита использовали соли, имеющие многозарядный катион и анион —  $Fe_2(SO_4)_3$  или  $Al_2(SO_4)_3$ . Соль вводили в воду затворения в количестве 1 % от массы клинкера, что соответствует ее оптимальной концентрации, повышающей прочность цементного камня [3].

Мелким заполнителем служил песок кварцевый ОАО «Камнереченский каменный карьер», ЗАО «НерудЗапсиб» (Новосибирская область). Минеральный состав песка, мас. %: кварц 80–90, полевой шпат 10–20. Истинная плотность зерен песка 2650 кг/м<sup>3</sup>, насыпная плотность песка 1420 кг/м<sup>3</sup>. Потеря массы при прокаливании 0,45 %, содержание глинистых и илистых примесей 0,5 %.

Прочность при сжатии и среднюю плотность определяли на образцах размером 100×100×100 мм, изготовленных из газобетонной смеси, содержащей мас. %: портландцементный клинкер — 27,0–28,5, песок кварцевый — 31,5, карбонатный компонент — 4,0–5,0, вода — 31,0–32,0, двуводный гипсовый камень — 2,27, газообразующий компонент — 0,07–0,09. Образцы твердели в условиях тепловлажностной обработки, проводимой по режиму: 3 ч — подъем температуры до 90 °C, 8 ч — изотермическая выдержка при данной температуре и 3 ч — снижение температуры до 20 °C.

**Таблица 2. Зависимость прочности и средней плотности газобетона от вида вяжущего**

Вяжущее	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа
Цемент	630	1,7
Клинкер, молотый отдельно от песка	628	2,1
Клинкер, молотый совместно с 50 % песка	610	2,8

В работе определили прочность и плотность газобетона, полученного с использованием портландцемента, измельченного клинкера, а также клинкера, измельченного совместно с 50 % песка (табл. 2).

При использовании измельченного клинкера прочность газобетона повышается на 30 % по сравнению с применением портландцемента. Еще более высокие показатели достигаются при измельчении клинкера совместно с 50 % песка. При этом плотность газобетона уменьшается с 630 до 610 кг/м<sup>3</sup>, а прочность при сжатии увеличивается на 65 %.

В дальнейшем использовали совместный помол клинкера с песком, минеральными добавками и карбонатным компонентом. Электролиты вводились в воду затворения. Полученными растворами затворялась сухая газобетонная смесь. Результаты испытаний газобетона представлены в табл. 3.

**Таблица 3. Прочность и плотность газобетона, содержащего добавки, изготовленного из портландцементного клинкера, хранившегося в течение 7 сут в нормальных условиях**

Добавки	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа	Увеличение прочности, %
Без добавок	610	2,8	—
Волластонит 7 %	600	3,1	11
Волластонит 7 % + 1 % Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	615	3,9	25
Волластонит 7 % + 1 % Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	625	4,4	57
Диопсид 5 %	580	3,3	18
Диопсид 5 % + 1 % Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	600	4,4	57
Диопсид 5 % + 1 % Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	610	4,9	75

Введение в газобетонную смесь 7 % волластонита или 5 % диопсида приводит к некоторому снижению плотности газобетона. Прочность при сжатии увеличивается на 11 % при введении волластонита и на 18 % при введении диопсида. Такое повышение прочности может быть обусловлено армирующим действием этих добавок. Значительно большее увеличение прочности газобетона наблюдается при введении в газобетонную смесь наряду с добавками волластонита и диопсида 1 % электролитов с многозарядными катионами и анионами: Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> и Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>. Особенно эффективно влияние последней соли. Увеличение прочности при сжатии составляет в случае добавки волластонита 57 %, диопсида — 75 %.

Введение добавок солей приводит к некоторому увеличению плотности газобетона по сравнению с составом без добавок электролитов. Однако по сравнению с газобетоном без минеральных добавок плотность ос-

тается практически неизменной. Действие добавок электролитов, содержащих ионы  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Al}^{3+}$ , может быть обусловлено их интенсивным обменом с ионом  $\text{Ca}^{2+}$  клинкера, в результате чего интенсифицируется гидратация силикатных клинкерных минералов — алита и белита.

При изготовлении газобетона в районах, где отсутствуют цементные заводы (Крайний Север, Дальний Восток) портландцементный клинкер может храниться длительное время, так как его доставка осуществляется в период краткосрочной летней навигации. В табл. 4 приведены данные о свойствах газобетона, полученного с помощью такого клинкера. Следует отметить, что при использовании длительно хранившегося клинкера прочность газобетона существенно понижается (на 25 %).

**Таблица 4. Прочность и плотность газобетона, содержащего добавки, изготовленного из портландцементного клинкера, хранившегося в течение 12 мес во влажных условиях**

Добавки	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа	Увеличение прочности, %
Без добавок	610	2,1	—
Волластонит 7 %	605	2,3	8,7
Волластонит 7 % + 1 % $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	613	3,1	48,0
Волластонит 7 % + 1 % $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	620	3,4	62,0
Диопсид 5 %	590	2,4	14,3
Диопсид 5 % + 1 % $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	603	3,4	62,0
Диопсид 5 % + 1 % $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	615	3,8	81,0

При введении дисперсных минеральных добавок и электролитов увеличение прочности аналогично полученному в случае использования клинкера, хранившегося 7 сут в нормальных условиях (см. табл. 3).

При совместном введении дисперсных минеральных добавок и электролитов прочность газобетона, полученного с использованием длительно хранившегося клинкера, превосходит прочность газобетона без добавок, изготовленного на клинкере, хранившемся 7 сут в нормальных условиях. Прочность газобетона из предлагаемой сухой смеси, затворенной солевым раствором, увеличивается в 2,9 раза по сравнению с прочностью газобетона, изготовленного на портландцементе без добавок. Кроме того, наблюдается снижение средней плотности газобетона с 630 до 615 кг/м<sup>3</sup>.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудяков, А.И. Газобетон на песке естественной гранулометрии для строительства монолитных малоэтажных домов [Текст] / А.И. Кудяков, А.В. Некрасов, Н.Г. Чубаков, Г.Н. Исаков // Изв. вузов. Строительство. — 1996. — № 1. — С. 46–48.
2. Бердов, Г.И. Влияние количества и дисперсности минеральных добавок на свойства цементных материалов [Текст] / Г.И. Бердов, Л.В. Ильина // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 11–12. — С. 11–16.
3. Бердов, Г.И. Активация цементов действием добавок электролитов [Текст] / Г.И. Бердов, Л.В. Ильина // Современные научноемкие технологии. — 2010. — № 9. — С. 108–110.

РАКОВ Михаил Андреевич, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

БЕРДОВ Геннадий Ильич, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

ИЛЬИНА Лилия Владимировна, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

Получено 28.07.14

**Rakov Michail Andreevich**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Berdov Gennadiy Ilich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Ilina Liliya Vladimirovna**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **INCREASED STRENGTH AERATED CONCRETE INTRODUCTION OF DISPERSIVE MINERAL SUPPLEMENTS AND ELECTROLYTES**

Joint injection of dispersed reinforcing additives (wollastonite, diopside) and multiply-charged cations and anions electrolytes ( $1\% \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  and  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) to the aerated concrete mixture provides higher strength aerated concrete on the 30–75 %. As a cohesive, it is advisable to use clinker, crushed together with sand and mineral additives, which improves the strength of the concrete on the 65 % as compared with portland cement.

**Key words:** concrete, portland cement, clinker, strength, density, particulate mineral supplements, electrolytes.

### **REFERENCES**

1. Kudyakov, A.I. Aerated concrete on natural granulometry sand for monolithic low-rise houses construction [Text] / A.I. Kudyakov, A.V. Nekrasov, N.G. Chubakov, G.N. Isakov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 1996. — N 1. — P. 46–48.
2. Berdov, G.I. Effect of quantity and dispersity mineral additives on properties of cements material [Text] / G.I. Berdov, L.V. Ilina // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 11–12. — P. 11–16.
3. Berdov, G.I. Cement activation by supplementation of electrolytes [Text] / G.I. Berdov, L.V. Ilina // Modern high technologies. — 2010. — N 9. — P. 108–110.

## ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 627.8 : 621.311.21

М.И. БАЛЬЗАННИКОВ

### ОБОСНОВАНИЕ УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ ГЭС ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ГИДРОУЗЛА

В статье приводится методика экономического обоснования установленной мощности гидроэлектростанции. Показывается необходимость выполнения анализа основных параметров водотока при подтверждении целесообразности размещения на ГЭС дополнительной мощности сверх гарантированной. Раскрывается использование критериев, основанных на методах анализа экономической эффективности объектов.

Ключевые слова: гидроузел, гидроэлектростанция, гарантированная мощность, установленная мощность, экономическое обоснование.

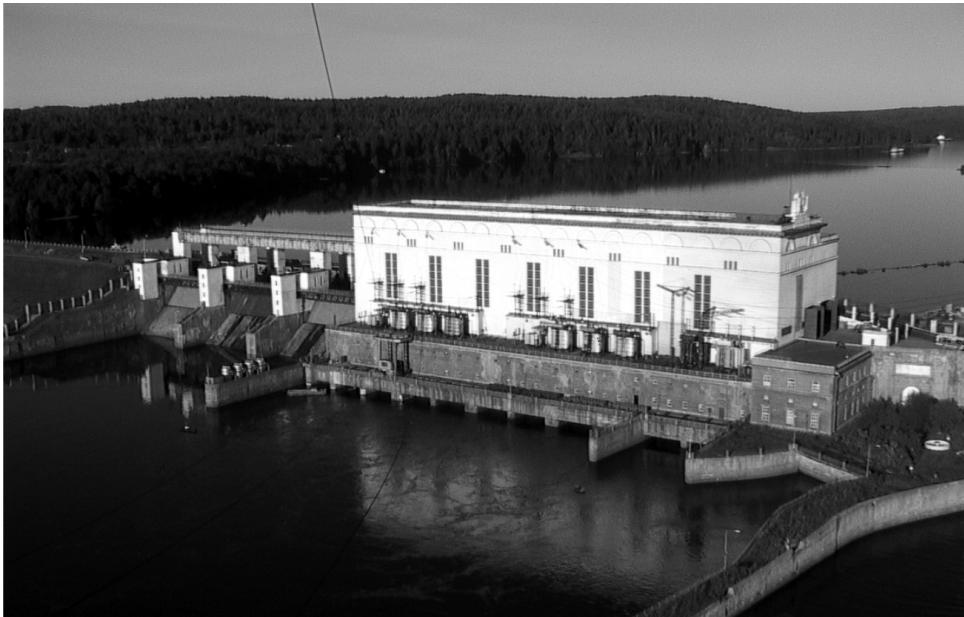
На гидроузлах энергетического назначения основным направлением использования речного стока является выработка электроэнергии, поскольку среди известных типов энергетических установок, использующих возобновляемые источники энергии, именно гидроэлектростанции наиболее эффективны по своим экономическим показателям, маневренным качествам основного оборудования и экологической безопасности [1–4].

Вместе с тем подпорные массивные сооружения гидроузла и само здание гидроэлектростанции требуют существенных финансовых затрат на возведение и оснащение технологическим оборудованием. В связи с этим, необходимо тщательное обоснование их основных параметров для обеспечения надежной работы и исключения необоснованных расходов [5–8].

В здании ГЭС размещаются гидроагрегаты, суммарная мощность которых дает установленную мощность станции — параметр, определяющий общие габариты объекта (рис. 1), а следовательно, и затраты на его возведение.

Проектирование каждой гидроэлектростанции — индивидуальный процесс и выполняется для конкретных условий: топографических, геологических, экономических, а также гидрологических. В частности, на обоснование величины установленной мощности ГЭС определяющее влияние оказывает результат водохозяйственного анализа для рассматриваемого речного объекта. При выполнении расчета суточного регулирования определяется гарантированная мощность  $N_{\text{rap}}$ , т.е. мощность, получение которой гарантируется на данном водотоке с заданной расчетной обеспеченностью.

Однако для проектирования гидроэлектростанции на рассматриваемом водотоке этого важного параметра недостаточно. Необходимо знать



*Рис. 1. Общий вид здания ГЭС русского типа*

установленную мощность ГЭС  $N_{\text{уст}}$ , на величину которой и подбирают параметры гидроагрегатов. В общем случае, установленная мощность ГЭС определяется суммой гарантированной, дополнительной и резервной мощностей:

$$N_{\text{уст}} = N_{\text{гар}} + N_{\text{доп}} + N_{\text{рез}}. \quad (1)$$

Установка на ГЭС резервной мощности  $N_{\text{рез}}$  предусматривается, если резервных мощностей в энергосистеме, в составе которой проектируется гидроэлектростанция, недостаточно для обеспечения надежного энергоснабжения потребителей. Различают следующие виды резервов: нагрузочный, частотный, экономический и аварийный. Обычно рекомендуется рассчитывать резервную мощность на ГЭС по величине, равной до 10 % величины гарантированной мощности.

Целесообразность размещения дополнительной мощности  $N_{\text{доп}}$  на ГЭС определяется технико-экономическим расчетом. При этом следует использовать известные методы анализа экономической эффективности ГЭС и сравнивать два варианта электроэнергетического развития энергосистемы: 1) с увеличением мощности на рассматриваемой ГЭС; 2) развитием мощности на других альтернативных электростанциях (например, ТЭС).

На предварительном этапе такого анализа необходимо рассмотреть две области графика обеспеченности мощности, полученного для данного речного стока в результате проведения водохозяйственных расчетов (рис. 2):

1 — область гарантированных мощностей рассматриваемого водотока — область А;

2 — область негарантированных мощностей — область Б.

В первой области — области А — получение мощности гарантируется с заданной расчетной обеспеченностью, поэтому сущность

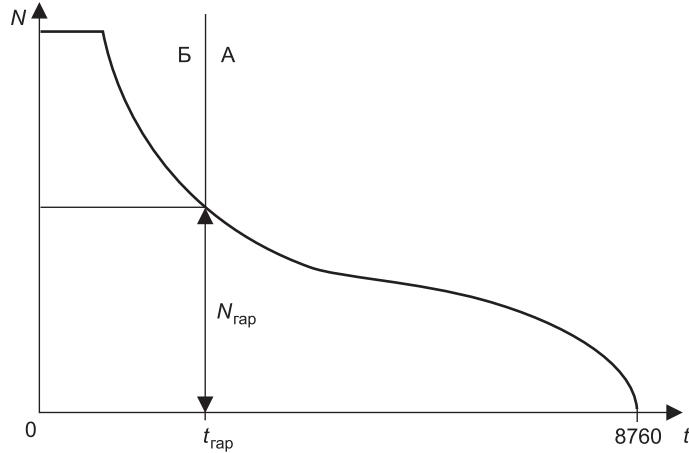


Рис. 2. График обеспеченности мощности рассматриваемого водотока

$N_{\text{гар}}$  — гарантированная мощность;  $t_{\text{rap}}$  — число часов, соответствующее величине гарантированной мощности

экономического анализа заключается в том, чтобы определить какой тип электростанций более выгоден для заданных экономических условий. Выясняется, является ли мощность на ГЭС вытесняющей мощностью для альтернативной электростанции (например, КЭС). Другими словами, означает ли размещение мощности на ГЭС неустановку этой мощности на КЭС (является ли ГЭС более экономичной, чем КЭС).

Следует учесть, что если мощность  $N_{\text{гар}}$  больше наибольшего значения мощностей кривой обеспеченности, то имеет место лишь первый случай — весь график относится к области А.

При экономическом анализе используются общие методы экономической эффективности. В частности, если применить метод дисконтированной стоимости, то в качестве критериального выражения, определяющеею экономическую эффективность установки дополнительной мощности на ГЭС, может быть принято выражение:

$$\sum (\Delta D - \Delta P)_{\text{ГЭС}} \geq \sum ((\Delta D - \Delta P)_{\text{ТЭС}} - \Delta P_{\text{тб}}), \quad (2)$$

где  $\Delta D$  и  $\Delta P$  — дополнительные доходы и дополнительные расходы соответственно для ГЭС и тепловой альтернативной электростанции;  $\Delta P_{\text{тб}}$  — дополнительные расходы по топливной базе.

Принимая во внимание равенство дополнительных доходов ГЭС и ТЭС в случае их корректного сопоставления и записывая выражение для одного года, получим условие в виде:

$$\Delta P_{\text{ГЭС}} \leq \Delta P_{\text{ТЭС}} + \Delta P_{\text{тб}}. \quad (3)$$

Дополнительные расходы по топливной базе могут быть определены как

$$\Delta P_{\text{тб}} = \Delta \mathcal{E} b, \quad (4)$$

где  $\Delta \mathcal{E}$  — дополнительная выработка электроэнергии, кВт·ч;  $b$  — стоимость одного кВт·ч электроэнергии, руб./кВт·ч, которая может быть определена произведением

$$b = \delta c,$$

где  $\delta$  — удельный расход условного топлива, кг / кВт·ч;  $c$  — стоимость условного топлива, руб./кг.

Разделив все члены выражения (3) на  $\Delta N_{\text{доп}}$ , получим критерий в удельных показателях:

$$\frac{\Delta P_{\text{ГЭС}}}{\Delta N_{\text{доп}}} \leq \frac{\Delta P_{\text{ТЭС}}}{\Delta N_{\text{доп}}} + \frac{\Delta \mathcal{E} b}{\Delta N_{\text{доп}}} \quad \text{или} \quad \Delta P_{\text{ГЭС}} \leq \Delta P_{\text{ТЭС}} + t_1 b, \quad (5)$$

где  $t_1 = \frac{\Delta \mathcal{E}}{N_{\text{доп}}}$  — число часов использования дополнительной мощности

(рис. 3). Из полученного неравенства окончательно выделим критерий в виде:

$$t_1 \geq \frac{\Delta P_{\text{ГЭС}} - \Delta P_{\text{ТЭС}}}{b}. \quad (6)$$

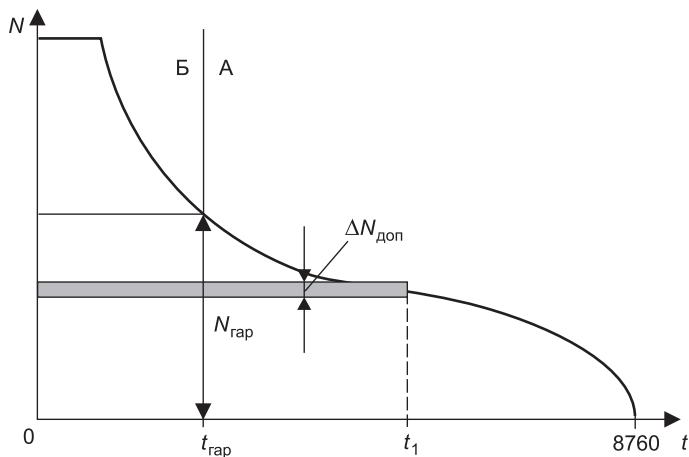


Рис. 3. К обоснованию дополнительной мощности в области гарантированных мощностей водотока

Если применить метод сравнительной экономической эффективности, то в качестве критерия, определяющего эффективность установки дополнительной мощности на ГЭС, может быть принято выражение:

$$\Delta Z_{\text{ГЭС}} \leq \Delta Z_{\text{ТЭС}} + \Delta Z_{\text{тб}}, \quad (7)$$

где  $\Delta Z_{\text{ГЭС}}$  — дополнительные расчетные затраты по ГЭС, которые рассчитываются как

$$\Delta Z_{\text{ГЭС}} = E \Delta K_{\text{ГЭС}} + \Delta I_{\text{ГЭС}}, \quad (8)$$

где  $\Delta K_{\text{ГЭС}}$  и  $\Delta I_{\text{ГЭС}}$  — соответственно дополнительные капитальные вложения и дополнительные издержки по ГЭС;  $E$  — коэффициент эффективности дополнительных капитальных вложений.

Проведя преобразования аналогично изложенным выше и пренебрегая величиной дополнительных капитальных вложений по топливной базе, получим условие в виде:

$$t_1 \geq \frac{(E \Delta K + \Delta I)_{\text{ГЭС}} - (E \Delta K + \Delta I)_{\text{ТЭС}}}{b}, \quad (9)$$

где  $\Delta K$  и  $\Delta I$  — соответственно удельные капитальные вложения и издержки электростанций (эксплуатационные расходы).

Условия (6) и (9) означают, что для обеспечения экономической эффективности дополнительной мощности она должна иметь число часов использования не менее величины, определяемой правой частью неравенства. Эти выражения и следует использовать для анализа. А именно, исходя из заданных экономических условий, подсчитывается правая часть критерия — граничное число часов использования дополнительной мощности  $t_1$  и наносится на график обеспеченности (см. рис. 3).

Критерии (6) и (9) показывают, что ГЭС экономично использовать в зоне графика обеспеченности, расположаемой правее подсчитанной величины. В частности, если получено, что граничное  $t_1$  больше  $t_{\text{rap}}$ , то дополнительную мощность на ГЭС сверх гарантированной по экономическим соображениям размещать нецелесообразно. Напротив, более выгодно уменьшить мощность ГЭС по сравнению с гарантированной мощностью до величины, соответствующей граничному значению  $t_1$  на графике. В этом случае дополнительная мощность на ГЭС  $N_{\text{доп}}$  будет со знаком «минус».

Если рассчитанная величина  $t_1$  окажется меньше  $t_{\text{rap}}$ , т.е. выйдет из области А графика обеспеченности и окажется в области Б, то однозначно определить экономическую целесообразность размещения дополнительной мощности на ГЭС не представляется возможным. Необходим второй этап экономического анализа — анализ области Б графика обеспеченности, т.е. области негарантированных мощностей.

Может иметь место и третий случай, о котором сказано выше, все поле графика обеспеченности относится только к области А. Это означает, что в таких условиях уменьшать мощность ГЭС по сравнению с гарантированной мощностью экономически не выгодно, но и увеличивать (размещать на ГЭС  $N_{\text{доп}}$ ) не представляется целесообразным, поскольку водоток используется достаточно полно. Следует принять  $N_{\text{доп}} = 0$ .

Вторая область — область Б — характеризуется тем, что для нее установка дополнительной мощности  $N_{\text{доп}}$  на ГЭС не гарантируется расчетной обеспеченностью водотока и поэтому не может привести к уменьшению мощности альтернативной ТЭС. Дополнительная мощность в этой области является дублирующей мощностью. Таким образом, на альтернативной ТЭС снижения капитальных вложений не происходит, а вместе с тем решается вопрос об установке на ГЭС дополнительной мощности, что обусловит увеличение затрат на ГЭС как капитальных (приобретение дополнительного гидросилового и вспомогательного технологического оборудования), так и эксплуатационных (на обслуживание этого оборудования). Такое решение может быть экономически оправдано только в том случае, если увеличение затрат окупится экономией топлива на ТЭС.

Дело в том, что при проектировании ГЭС принимается достаточно высокое значение расчетной обеспеченности, достигающее 90–95 %, поэтому часть энергии водотока оказывается неиспользованной (на гидроузле часть расхода сбрасывается через водосбросы). В связи с этим, в паводок и многоводные годы может оказаться экономически выгодно

включать в работу дополнительные мощности на ГЭС, а турбины на ТЭС останавливать и экономить, тем самым, дорогое органическое топливо.

При анализе также могут быть использованы различные методы экономического обоснования. При применении метода дисконтированной стоимости критериальное выражение приведено выше в виде (3). Поскольку изменений расходов по тепловой альтернативной электростанции не будет происходить,  $\Delta P_{\text{ТЭС}} = 0$ , а критерий запишется как

$$\Delta P_{\text{ГЭС}} \leq \Delta P_{\text{ТЭС}}. \quad (10)$$

После преобразований, подобных приведенным выше, получим:

$$t_2 \geq \frac{\Delta P_{\text{ГЭС}}}{b}. \quad (11)$$

При использовании метода сравнительной экономической эффективности также  $\Delta Z_{\text{ТЭС}} = 0$ , а критерий может быть представлен в виде

$$\Delta Z_{\text{ГЭС}} \leq \Delta Z_{\text{раб}}, \quad (12)$$

где  $\Delta Z_{\text{ГЭС}}$  — дополнительные расчетные затраты.

Опуская промежуточные преобразования, получим условие:

$$t_2 \geq \frac{(E\Delta K + \Delta I)_{\text{ГЭС}}}{b}. \quad (13)$$

Условия (11) и (13) означают, что размещение дополнительной мощности на ГЭС экономически выгодно, если число часов ее использования оказывается не менее, чем правая часть неравенства, т.е. в области Б графика обеспеченности и в зоне, расположенной правее величины  $t_2$  (рис. 4).

Для практического использования полученных критериев при выполнении экономического анализа необходимо следующее. Для заданных экономических условий подсчитать правую часть критерия — граничное число часов использования дополнительной мощности  $t_2$  и полученное значение нанести на график обеспеченности (см. рис. 4). Если  $t_2$  окажет-

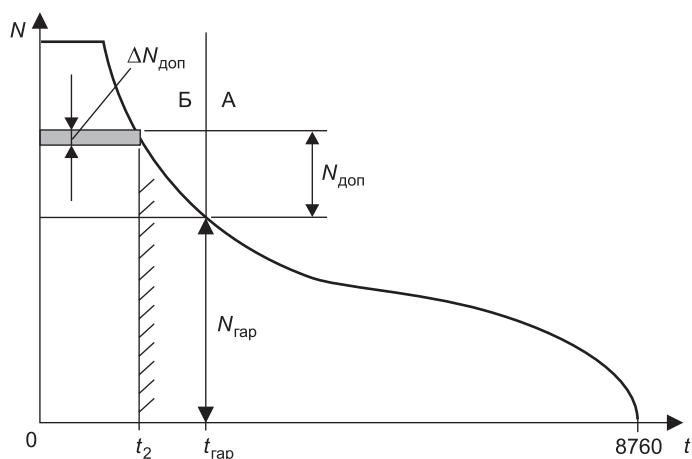


Рис. 4. К обоснованию дополнительной мощности в области негарантированных мощностей водотока

ся больше  $t_{\text{тап}}$ , т.е. выйдет из области Б в область А, то это будет означать, что дополнительную мощность на ГЭС, исходя из экономических условий, размещать нецелесообразно. В этом случае следует принять  $N_{\text{доп}} = 0$ .

Если рассчитанная граничная величина  $t_2$  будет меньше  $t_{\text{тап}}$ , т.е. окажется внутри области Б, то мощность ГЭС, соответствующая на графике обеспеченности величине  $t_2$ , будет наибольшей мощностью, обеспечивающей экономическую эффективность ГЭС. Другими словами, размещение дополнительной мощности на ГЭС выгодно, причем наибольшее значение дополнительной мощности  $N_{\text{доп}}$  определится на графике обеспеченности разностью мощностей, соответствующих значениям  $t_2$  и  $t_{\text{тап}}$  (см. рис. 4).

Таким образом, после обоснования возможности размещения (или не размещения) дополнительной мощности  $N_{\text{доп}}$  и определения ее величины, а также назначения величины резервной мощности  $N_{\text{рез}}$ , окончательно вычисляется установленная мощность ГЭС, на которую и выполняются дальнейшие расчеты по определению параметров гидроагрегатов.

**Выводы.** 1. Затраты на возведение и эксплуатацию агрегатного здания ГЭС гидроузла энергетического назначения обусловлены параметрами и количеством гидроагрегатов, которые, в свою очередь, зависят от установленной мощности гидроэлектростанции. Поэтому важно правильно и обоснованно производить выбор установленной мощности ГЭС для конкретных условий рассматриваемого створа реки.

2. Установленная мощность ГЭС обосновывается результатами водно-энергетических расчетов, которыми определяется гарантированная составляющая мощности, и технико-экономическим анализом, на основании которого решается вопрос о целесообразности размещения дополнительной (дублирующей) составляющей установленной мощности.

3. При анализе экономической целесообразности размещения дополнительной мощности и определения ее величины рекомендуется рассматривать области гарантированных и негарантированных мощностей графика обеспеченности мощности водотока и использовать общие методы определения экономической эффективности: дисконтированной стоимости, сравнительной экономической эффективности и др. В качестве критерия обоснованности размещения дополнительной мощности на ГЭС рекомендуется принимать условие обеспечения числа часов ее использования не менее граничного значения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бальзанников, М.И. Решение проблем развития энергетики на основе возобновляемых источников энергии в Среднем Поволжье [Текст] / М.И. Бальзанников // Научная школа академика Ю.С. Васильева в области энергетики и охраны окружающей среды: сб. науч. тр. — СПб. : СПбГПУ, 2004. — С. 25–39.
2. Бальзанников, М.И. Актуальные направления развития возобновляемой энергетики в Среднем Поволжье [Текст] / М.И. Бальзанников // Вестн. Волж. региона. отд-ния Рос. акад. архитектуры и строит. наук. Вып. 8. — Н. Новгород : Изд-во НГАСУ, 2005. — С. 173–185.

3. Бальзанников, М.И. Энергетические установки на основе возобновляемых источников энергии и особенности их воздействия на окружающую среду [Текст] / М.И. Бальзанников // Вестн. Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Стр-во и архитектура. — 2013. — Вып. 31(50), ч. 1. — С. 336–342.
4. Бальзанников, М.И. Развитие возобновляемой энергетики – важный вклад в обеспечение защиты окружающей среды [Текст] / М.И. Бальзанников, С.В. Евдокимов, Ю.М. Галицкова // Пром. и гражд. стр-во. — 2014. — № 3. — С. 16–19.
5. Пиявский, С.А. Обоснование конструкций водопропускных гидротехнических сооружений в условиях неопределенности [Текст] / С.А. Пиявский, С.В. Евдокимов // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 6. — С. 36–43.
6. Евдокимов, С.В. Оценка надежности гидротехнических сооружений [Текст] / С.В. Евдокимов, Т.В. Дормидонтова // Вестн. СГАСУ. Градостроительство и архитектура. — 2012. — № 1. — С. 49–53.
7. Использование водной энергии [Текст] / Под ред. Ю.С. Васильева. — М. : Энергоатомиздат, 1995. — 608 с.
8. Соболь, С.В. Использование водной энергии малых рек [Текст] / С.В. Соболь, А.В. Февралев. — Н. Новгород : НГАСУ, 2009. — 284 с.

*БАЛЬЗАННИКОВ Михаил Иванович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: sgasu@samgasu.ru  
Самарский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 28.07.14

**Balzannikov Michail Ivanovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: sgasu@samgasu.ru, Samara State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

## **FEASIBILITY STUDY OF INSTALLED CAPACITY AT HPP HYDROELECTRIC COMPLEX**

The article describes the methods of economic feasibility study of the installed capacity at hydroelectric power plants. It proves the importance of analyzing the basic parameters of a watercourse when studying the feasibility of setting extra capacity over the firm one at hydroelectric power plants. The article gives reasons for the use of criteria based on the methods of cost-effectiveness analysis of objects.

**Key words:** hydroelectric complex, hydroelectric power station, firm capacity, installed capacity, economic feasibility.

## **REFERENCES**

1. Balzannikov M.I. Reshenie problem razvitiya energetiki na osnove vozobnovlyayemykh istochnikov energii v Sredнем Povolzh'e [Solving the problems of power generation based on renewable energy sources in the Middle Volga Region] // Academician Yu.S. Vasiliev's school of Science in the field of energy and environmental protection: Proceedings. St. Petersburg, SPbSPU, 2004, pp. 25–39.
2. Balzannikov M.I. Aktualnye napravleniya razvitiya vozobnovlyayemoy energetiki v Sredнем Povolzhe [Current trends of renewable energy development in the Middle Volga Region] // Vestnik Volzhskogo regionalnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii arkhitektury i stroitelnykh nauk. N 8. N. Novgorod, NGASU, 2005, pp. 173–185.
3. Balzannikov M.I. Energeticheskie ustanovki na osnove vozobnovlyayemykh istochnikov energii i osobennosti ikh vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu [Power plants based on renewable energy sources and their impact on the environment] // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Stroitelstvo i arkhitektura, 2013, N 31(50), p. 1, pp. 336–342.

4. Balzannikov M.I., Evdokimov S.V., Galitskova Yu.M. Razvitiye vozobnovlyayemoy energetiki — vazhniy vklad v obespechenie zashchity okruzhayushchey sredy [Development of renewable energy generation as an important contribution to environmental protection] // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo, 2014, N 3, pp. 16–19.
  5. Piayavskiy S.A., Evdokimov S.V. Obosnovanie konstruktsiy vodopropusknih gidrotehnicheskikh sooruzheniy v usloviyah neopredelennosti [Justification of culvert hydrotechnical structures under conditions of uncertainty] // Izvestiya vysshikh uchebnyih zavedeniy. Stroitelstvo, 2012, N 6, pp. 36–43.
  6. Evdokimov S.V., Dormidontova T.V. Otsenka nadezhnosti gidrotehnicheskikh sooruzheniy [Assessment of reliability of hydraulic structures] // Vestnik SGASU. Gradostroitelstvo i arkhitektura, 2012, N 1, pp. 49–53.
  7. Ispolzovanie vodnoy energii [Use of water power] / Edited. by Yu.S. Vasilev. Moscow, Energoatomizdat, 1995, 608 p.
  8. Sobol S.V., Fevralev A.V. Ispolzovanie vodnoy energii malyih rek [Use of water power of small rivers]. — N. Novgorod, izd-vo NGASU, 2009, 284 p.
-

## САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 697.422.8

А.Г. БАГОУТДИНОВА, Я.Д. ЗОЛОТОНОСОВ, В.Н. ПОСОХИН

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИНТОВЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Описаны конструкции теплообменных элементов с винтовой поверхностью для трубных пучков повышенной теплогидродинамической эффективности. На базе фундаментальных положений аналитической и дифференциальной геометрии записаны векторно-параметрические уравнения таких поверхностей. Проведен анализ степени развития поверхностей теплообменных элементов в зависимости от геометрических параметров исходного профиля, формирующего винтовую поверхность.

**Ключевые слова:** теплообменный элемент, поверхность, математическая модель.

Проблема повышения теплогидродинамической эффективности теплообменных аппаратов является весьма актуальной для систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения, а также в химической, нефтеперерабатывающей и пищевой технологиях. В этой связи, необходимо совершенствование современных подходов к конструированию и расчету теплообменных аппаратов и создание на этой основе инновационных технологий их производства. Ранее авторами [1–4] предложена серия теплообменных элементов с винтовой поверхностью теплообмена.

На рис. 1, *a* представлен теплообменный элемент, образованный вращением уголкового профиля (рис. 1, *б*) по винтовой линии.

Оценим степень развития поверхности винтового теплообменного элемента по сравнению с поверхностью гладкотрубного элемента  $F_{\text{гл}}$  диаметром  $d_{\text{гл}}$ . Ясно, что степень развития поверхности теплообмена

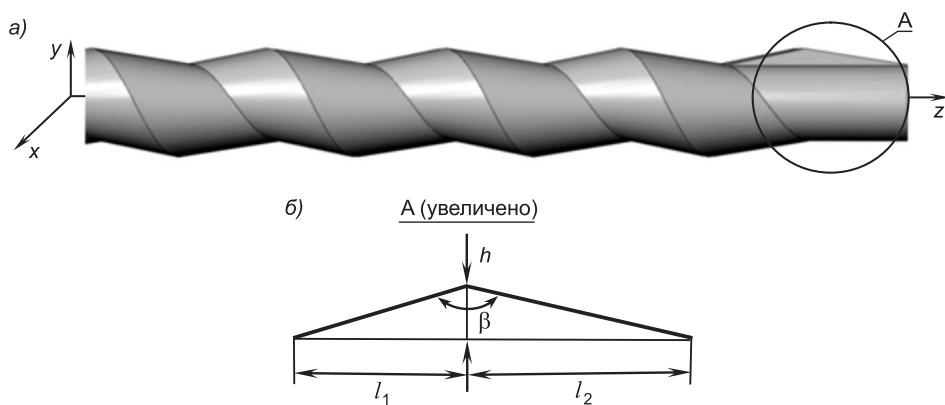


Рис. 1. Винтовой теплообменный элемент

*а* — поверхность винтового теплообменного элемента; *б* — уголковый профиль

$\psi = F / F_{\text{пл}}$  зависит от угла  $\beta$  при вершине уголкового профиля и его высоты  $h$ :

$$\psi = F / F_{\text{пл}} = \frac{1}{\sin \beta / 2} (1 - h / d_{\text{пл}}), \quad (1)$$

здесь  $F$  — площадь внешней поверхности теплообменного элемента.

Функция  $y = \frac{1}{\sin \beta / 2}$  принимает минимальное значение, равное 1,

при  $\beta = \pi$  и стремится к бесконечности при  $\beta \rightarrow 0$ . За счет уменьшения угла  $\beta$  можно получить существенное увеличение теплообменной поверхности. Так, если взять за основу равнобедренный уголковый профиль с прямым углом при вершине ( $\beta = \pi / 2$ ), то степень развития поверхности  $\psi = \sqrt{2}(1 - h / d_{\text{пл}})$ . Отсюда следует, что максимальная (предельная) степень развития поверхности, равная  $\psi_{\text{пред}} = \sqrt{2}$ , достигается при  $h \rightarrow 0$ , когда число уголковых выступов на единице длины трубы стремится к бесконечности.

Если взять за основу равносторонний уголковый профиль ( $\beta = \pi / 3$ ), то формула (1) приобретает вид  $\psi = 2(1 - h / d_{\text{пл}})$  и  $\psi_{\text{пред}} = 2$ . Получить степень развития поверхности  $\psi > 2$  можно за счет дальнейшего уменьшения угла  $\beta$ . Однако это вызовет существенный рост гидравлического сопротивления винтовой трубы, будет способствовать быстрому загрязнению теплообменной поверхности и, соответственно, снижению эффективности теплообмена. Применение теплообменных поверхностей при  $\psi > 1,15$  считается целесообразным, поскольку положительно влияет на увеличение теплового потока, передаваемого через стенку и обеспечивает снижение металлоемкости теплообменного аппарата.

Для организации крупнотоннажного производства предлагаемых теплообменных элементов, реализуемого с использованием современных компьютерных технологий, необходимо строгое математическое описание конфигурации их поверхностей. В работе [5] рассмотрен общий метод построения поверхности, образованной движением непрерывной кривой  $\rho = \rho(s)$  вдоль криволинейной направляющей  $\gamma: \vec{r} = \vec{r}(t)$ , где  $s$  и  $t$  — некоторые параметры кривых. Согласно этому методу, радиус-вектор точки поверхности представляется в виде

$$\vec{r}(t, s) = \vec{r}(t) + \rho(s) \vec{v}(t) + \rho(s) \vec{\beta}(t), \quad (2)$$

где  $\vec{v}(t)$  и  $\vec{\beta}(t)$  — единичные векторы главной нормали и бинормали в точке, соответствующей значению параметра  $t$ .

Единичные векторы касательной  $\vec{\tau}$ , нормали  $\vec{v}$  и бинормали  $\vec{\beta}$  образуют подвижный ортогональный базис, перемещающийся вдоль кривой  $\gamma$ , и вычисляются по формулам:

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{r} / dt}{|d\vec{r} / dt|}, \quad \vec{v} = \frac{d\vec{\tau} / dt}{|d\vec{\tau} / dt|}, \quad \vec{\beta} = \vec{\tau} \vec{v}.$$

Для описания поверхности предлагаемого теплообменного элемента (см. рис. 1, а) в качестве направляющей кривой  $\gamma$  выберем винтовую линию, расположенную на круговом цилиндре радиуса  $r_{\text{пл}}$ :

$$x = r_{\text{пл}} \cos t, \quad y = r_{\text{пл}} \sin t, \quad z = bt,$$

здесь  $t$  — параметр, характеризующий положение точки на винтовой линии ( $0 \leq t \leq 2\pi n$ ),  $n$  — число витков;

$$b = \frac{l}{2\pi}, \quad l \quad \text{шаг винтовой линии.}$$

В качестве образующей выберем ломаную, состоящую из двух звеньев (рис. 1, б). Тогда

$$\vec{r}(t) = \begin{pmatrix} r_{\text{пл}} \cos t \\ r_{\text{пл}} \sin t \\ bt \end{pmatrix}, \quad 0 \leq t \leq 2\pi n, \quad \vec{\rho}(s) = \begin{cases} hs & 0 \leq s \leq 1, \\ (1-s)l & 1 < s \leq 2, \\ 0 & 2 < s \leq 3, \end{cases} \quad (3)$$

здесь  $l = l_1$  для первого звена,  $l = -l_2$  для второго звена,  $b = \frac{l_1 + l_2}{2\pi}$ .

Вычислим единичные векторы касательной, нормали и бинормали:

$$\vec{\tau} = \frac{1}{\sqrt{r_{\text{пл}}^2 + b^2}} \begin{pmatrix} -r_{\text{пл}} \sin t \\ r_{\text{пл}} \cos t \\ b \end{pmatrix}, \quad \vec{v} = \begin{pmatrix} -\cos t \\ -\sin t \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \vec{\beta} = -\frac{1}{\sqrt{r_{\text{пл}}^2 + b^2}} \begin{pmatrix} bs \sin t \\ -b \cos t \\ r_{\text{пл}} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Подставляя выражения (3), (4) в (2), получим векторно-параметрические уравнения поверхности предлагаемого теплообменного элемента:

$$\vec{r}(t, s) = \begin{pmatrix} r_{\text{пл}} \cos t \\ r_{\text{пл}} \sin t \\ bt \end{pmatrix} - hs \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \\ 0 \end{pmatrix} - \frac{l(1-s)}{\sqrt{r_{\text{пл}}^2 + b^2}} \begin{pmatrix} bs \sin t \\ -b \cos t \\ r_{\text{пл}} \end{pmatrix}, \quad 0 \leq t \leq 2\pi n, \quad 0 \leq s \leq 1. \quad (5)$$

Запишем уравнение (5) в безразмерном виде. В качестве характерного размера выберем радиус гладкой трубы  $r_{\text{пл}}$ . Обозначим безразмерный радиус-вектор точки поверхности как  $\vec{r}_0(t, s)$ . Тогда  $\vec{r}(t, s) = r_{\text{пл}} \vec{r}_0(t, s)$ . Уравнение (5) в безразмерном виде запишется следующим образом:

$$\vec{r}_0(t, s) = \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \\ b_0 t \end{pmatrix} - h_0 s \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \\ 0 \end{pmatrix} - \frac{l_0(1-s)}{\sqrt{l^2 + b_0^2}} \begin{pmatrix} b_0 s \sin t \\ -b_0 \cos t \\ 1 \end{pmatrix}, \quad 0 \leq t \leq 2\pi n, \quad 0 \leq s \leq 1, \quad (6)$$

где  $b_0 = b / r_{\text{пл}}$ ,  $h_0 = h / r_{\text{пл}}$ ,  $l_0 = l / r_{\text{пл}}$  — безразмерные величины.

По уравнению (6) в системе Matlab построена винтовая поверхность (рис. 2) при  $b_0 = 1,2$ ;  $h_0 = 0,2$ ;  $l_0 = 1,2$ ;  $n = 10$ , что соответствует геометрическим размерам винтового теплообменного элемента:

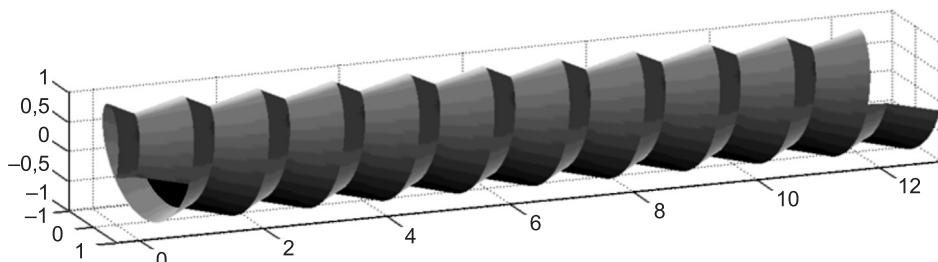


Рис. 2. Поверхность винтового теплообменного элемента

$$r_{\text{пл}} = 10 \text{ мм}; l = 12 \text{ мм} (l_1 = 8 \text{ мм}, l_2 = 4 \text{ мм}); h = 2 \text{ мм}; n = 10.$$

Одной из наиболее перспективных технологий получения винтовых теплообменных элементов является способ ротационной ковки (или ротационного обжатия), осуществляемый на специальных ротационно-ковочных устройствах, где уравнения (6) используются при работе аппаратно-программного комплекса, обеспечивающего непрерывное производство труб [6].

На рис. 3 представлен фрагмент теплообменного элемента, полученного методом ротационного обжатия. Данная технология позволяет изготавливать широкую номенклатуру витых теплообменных элементов.



Рис. 3. Фрагмент теплообменного элемента, полученного методом ротационного обжатия

На рис. 4, например, изображен фрагмент теплообменного элемента с винтовой канавкой. Такая конструкция обеспечивает опережающее увеличение интенсивности теплообмена по сравнению с увеличением гидросопротивления.



Рис. 4. Винтовая труба с канавками

На рис. 5, а представлен теплообменный элемент с чередующимися секциями правого и левого вращения с участками стабилизации в виде прямолинейных вставок [2]. В этих каналах при движении жидкости в секциях правого и левого вращения, в комбинации с участками стабилизации, обеспечивается перемешивание среды при опережающем росте интенсивности теплоотдачи и сопоставимых значениях гидравлических сопротивлений с каналами, выполненными из секций с односторонним спиральным оребрением.

На рис. 5, б приведен фрагмент участка стабилизации, снабженный ребрами плавникового типа, которые также способствуют интенсифика-

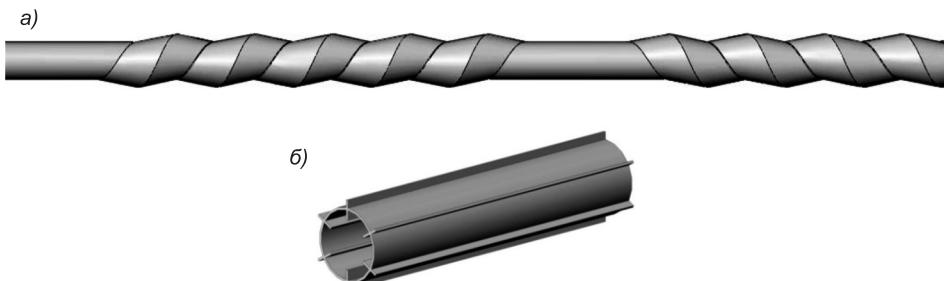


Рис. 5. Теплообменный элемент с чередующимися секциями правого и левого вращения  
а — с участком стабилизации в виде прямолинейных вставок; б — фрагмент участка стабилизации, снабженный ребрами плавникового типа

ции теплоотдачи и снижению гидравлического сопротивления, вызванного эффектом торможения вращающегося потока на входной кромке последующей секции. Ребра позволяют сократить длину проточной части участка стабилизации, погасить эффект вращения перед входной кромкой, следующей по потоку винтовой секции, и увеличить теплообменную поверхность.

Настоящая статья является попыткой представить современные тенденции в разработке инновационных теплообменных элементов для крупнотоннажного производства энерго- и ресурсосберегающего теплообменного оборудования и в частности с использованием технологии ротационной ковки.

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Пат. 119452 на пол. мод. РФ. Теплообменный элемент [Текст] / А.Я. Золотоносов, Я.Д. Золотоносов, А.Г. Багоутдинова, И.И. Осыка. — № 2012109355/06; заявл. 12.03.12; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23.
2. Пат. 139566 на пол. мод. РФ. Теплообменный элемент [Текст] / А.Я. Золотоносов, Я.Д. Золотоносов, С.А. Мустакимова, А.Г. Багоутдинова, М.Н. Яхнев. — № 2013125072/06; заявл. 25.07.13; опубл. 20.04.2014, Бюл. № 11.
3. Пат. 146241 на пол. мод. РФ. Теплообменный элемент [Текст] / Я.Д. Золотоносов, К.С. Галимов. — № 201446289; заявл. 20.04.14; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 28.
4. Пат. 140683 на пол. мод. РФ. Теплообменный элемент [Текст] / Я.Д. Золотоносов, А.М. Тартыгашева. — № 2013154131; заявл. 05.12.13; опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14.
5. Багоутдина, А.Г. Математическое описание и визуализация теплообменных поверхностей в форме пружинно-витых каналов и труб типа «конфузор-диффузор» [Текст] / А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов // Изв. вузов. Проблемы энергетики. — 2012. — № 7–8. — С. 80–86.
6. Багоутдина, А.Г. Технология изготовления труб типа «конфузор-диффузор» с винтовой поверхностью теплообмена [Текст] / А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов, М.Н. Яхнев // Актуальные инженерные проблемы химических и нефтехимических производств: материалы Всерос. науч.-практ. конф. — Казань, 2013. — С. 151–154.

*БАГОУТДИНОВА Альфия Гиззетдиновна, канд. техн. наук  
Казанский государственный архитектурно-строительный университет  
ЗОЛОТОНОСОВ Яков Давидович, д-р техн. наук, проф.  
Казанский государственный архитектурно-строительный университет  
ПОСОХИН Владимир Николаевич, д-р техн. наук, проф.  
Казанский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 18.07.14

**Bagoutdinova Alfija Gizzetdinovna**, candidate of technical sciences, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

**Zolotonosov Yakov Davidovich**, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

**Posohin Vladimir Nikolaevich**, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

#### **MATHEMATICAL MODELLING OF SCREW HEAT EXCHANGE ELEMENTS**

Designs of heat exchange elements with a screw surface for pipe bunches of the raised warmly and hydrodynamic efficiency are described. On the basis of fundamental provisions of analytical and differential geometry the vector and parametrical equations of such surfaces

are written down. The analysis of extent of development of surfaces of heat exchange elements depending on geometrical parameters of the initial profile forming a screw surface is carried out.

**Key words:** heat exchange elements, surfase, mathematical model.

## REFERENCES

1. Patent 119452 on the floor. fashion. Growing up. The Federation. Heat exchanging element [Text] / A.Ya. Zolotonosov, Ya.D. Zolotonosov, A.G. Bagoutdinova, I.I. Osika. — N 2012109355/06; Appl. 12.03.12; publ. 20.08.2012, Bull. N 23.
  2. Patent 139566 on the floor. fashion. Growing up. The Federation. Heat exchanging element [Text] / A.Ya. Zolotonosov, Ya.D. Zolotonosov, S.A. Mustakimova, A.G. Bagoutdinova, M.N. Yachnev. — N 2013125072/06; Appl. 25.07.13; publ. 20.04.2014, Bull. N 11.
  3. Patent № 146241 on the floor. fashion. Growing up. The Federation. Heat exchanging element [Text] / Ya.D. Zolotonosov, K.S. Galimov. — N 201446289; Appl. 20.04.14; publ. 10.10.2014, Bull. N 28.
  4. Patent 146241 on the floor. fashion. Growing up. The Federation. Heat exchanging element [Text] / Ya.D. Zolotonosov, A.M. Tartigascheva. — N 2013154131; Appl. 05.12.13; publ. 20.05.2014, Bull. N 14.
  5. Bagoutdinova, A.G. Mathematical description and visualization of heat-exchange surfaces in form the spring-curly channels and pipes of type «confusor-diffusor» [Text] / A.G. Bagoutdinova, Ya.D. Zolotonosov // Proceedings of the universities. Energy problems. — 2012. — N 7–8. — P. 80–86.
  6. Bagoutdinova, A.G. Pipe technology such as «konfuzor-diffuser» with helical surface heat transfer [Text] / A.G. Bagoutdinova, Ya.D. Zolotonosov, M.N. Yakhnev // Actual engineering problems of chemical and petrochemical industries: Proceedings of All-Russian scientific and practical conference. — Kazan, 2013. — P. 151–154.
-

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.542.001

Д.Э. АБРАМЕНКОВ, Э.А. АБРАМЕНКОВ, В.А. ГВОЗДЕВ,  
В.А. КАНИВЕЦ, М.С. МАЛЫШЕВ

## ПНЕВМОУДАРНЫЙ МЕХАНИЗМ ДРОССЕЛЬНО-БЕСКЛАПАННОГО ТИПА И ЕГО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Рассматривается устройство и принцип работы синтезированного пневмоударного механизма на базе дроссельного воздухораспределения и приводится его физико-математическое описание.

**Ключевые слова:** пневмоударный механизм, бародинамика, термодинамика, давление воздуха, расход воздуха, впускной дроссель, канал перепуска.

**Введение.** Пневмоударный механизм, рассматриваемый в данной работе, выполнен на базе классификации признаков-элементов, характерных для всех известных до настоящего времени пневмоударных механизмов [1].

Признаки-элементы пневмоударного механизма являются простыми в конструктивном и технологическом исполнении, но дроссельное воздухораспределение, благодаря перепуску, исключает наличие непроизводительного расхода части воздуха.

**Устройство и рабочий процесс пневмоударного механизма.** Согласно рис. 1, механизм устроен и работает следующим образом.

Сжатый воздух из сети по каналу А с проходным сечением  $\omega_c$  поступает в предкамеру Б с объемом  $V_c$  в корпусе 1 массой  $m_k$  и непрерывно по дроссельному каналу В с проходным сечением  $\omega_p$  — в камеру рабочего хода Г с объемом  $V_p$ , откуда периодически, в зависимости от положения ударника 2 массой  $m_y$ , по перепускному каналу Д в виде лыски [2] или

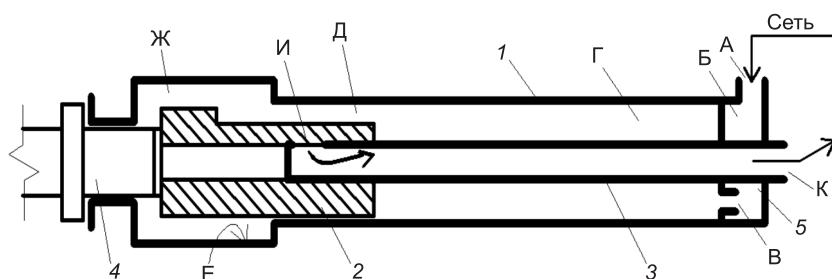


Рис. 1. Принципиальная схема дроссельного пневматического ударного механизма (обозначения и пояснения см. в тексте)

паза с проходным сечением  $\omega_x$  — в выточку Е корпуса 1 с образованием в ней камеры Ж холостого хода с объемом  $V_x$ .

Опорожнение камеры Ж осуществляется периодически посредством выпускного канала И с проходным сечением  $\omega_{ax}$  в трубке 3 с продольным выпускным каналом К с проходным сечением  $\omega_k > \omega_{ax}$ . Выпуск отработавшей части воздуха из камеры Г в атмосферу не осуществляется.

Под действием разницы силовых импульсов со стороны камер Г и Ж ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по хвостовику рабочего инструмента 4.

Устройство включения и выключения впуска воздуха в сетевую камеру, обеспечивающее в объеме  $V_c$  давление воздуха близкое к сетевому, может быть любого конструктивного исполнения.

Устройство средств шумозащиты и виброзащиты и их конструктивное исполнение должно соответствовать значениям силы отдачи, амплитуде, перемещению, ускорению ударника и корпуса машины с конкретным пневматическим ударным механизмом.

Введем дополнительные обозначения и ограничения для бародинамических, термодинамических и баромеханических параметров рабочего процесса механизма:

$p_c$ ,  $p_p$ ,  $p_x$  — давление воздуха в сетевой камере, камерах рабочего и холостого ходов с соответствующими объемами:  $V_c$ ,  $V_p$ ,  $V_x$ ;

$\Psi_{yk}$ ,  $\Psi_{yt}$ ,  $\Psi_{kx}$  — площади проходных сечений кольцевых зазоров в парах: «ударник — корпус», «ударник — трубка» и «корпус — хвостовик инструмента» — подсчитываются по посадкам и допускам соответствующих ГОСТ;

$\Phi_c$ ,  $\Phi_p$ ,  $\Phi_x$ ,  $\Psi_{yk}$ ,  $\Psi_{yt}$ ,  $\Phi_{kx}$  — бародинамический коэффициент для каналов с проходными сечениями  $\omega_c$ ,  $\omega_p$ ,  $\omega_x$ ,  $\Psi_{yk}$ ,  $\Psi_{yt}$ ,  $\Psi_{kx}$ ;

$W$  — термодинамический коэффициент:  $W = [2kR / (k - 1)]^{1/2}$ ,

где  $k$  — показатель процесса и  $R$  — газовая постоянная;

$F_{yk}$ ,  $F_{yt}$ ,  $F_{kx}$  — силы трения в контактных парах с сечениями зазоров  $\Psi_{yk}$ ,  $\Psi_{yt}$ ,  $\Psi_{kx}$ ;

$F_h$  — усилие нажатия на корпус;

$(d^2x_y/dt^2)$ ,  $(d^2x_k/dt^2)$  — ускорения движения ударника и корпуса;

$(dx_y/dt)_y$ ,  $(dx_k/dt)_o$  — скорости отскока для ударника и корпуса до и после отскока;

$k_y$ ,  $k_k$  — коэффициенты отскока ударника от хвостовика инструмента и корпуса от буртика инструмента;

$t$  — текущее время;

$\mu_{xp}$ ,  $\mu_p$ ,  $\mu_{ax}$ ,  $\mu_a$  — коэффициенты расходов воздуха каналами Д, В, И, А.

Для упрощения расчетов проходное сечение лыски Д (рис. 2) целесообразно заменить на равное ему проходное сечение паза  $\omega_x = \mu_{xp}(a \cdot b)$ ,

где  $\mu_{xp}$  — коэффициент расхода воздуха канала с геометрическим сечением  $(a \cdot b)$ .

Целесообразно для расчетов принять значения  $\mu_{xp}$ ,  $\mu_p$ ,  $\mu_{ax}$  и  $\mu_a$  равными единице.

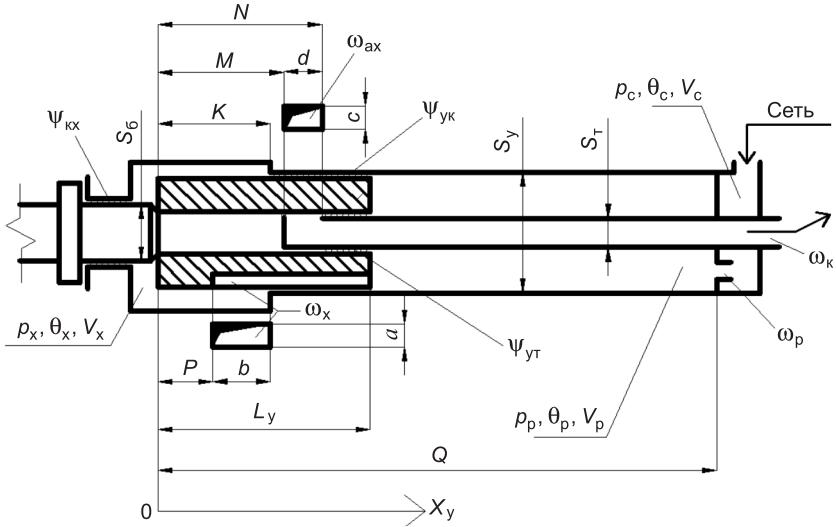


Рис. 2. Расчетная схема пневмоударного механизма

После уточнения геометрических сечений  $\omega_x$ ,  $\omega_p$ ,  $\omega_{ax}$  и  $\omega_k$  определяются действительные значения коэффициентов расхода воздуха, например, по [3] или продувкой реальных каналов.

Для рассматриваемого пневмоударного механизма представим описание бародинамического, термодинамического и баромеханического процессов с учетом перетечек между камерами через зазоры, образованные допусками и посадками между ударником — трубкой, ударником — корпусом и корпусом — хвостовиком рабочего инструмента, а также сил трения, возникающего в указанных парах вследствие перемещения ударника и корпуса.

Так, для рабочего процесса пневмоударного механизма состояние в объемах рабочих камер опишется следующими системами уравнений, объединенными соответствующими составляющими.

Бародинамическая составляющая —

$$\begin{cases} dp_c / dt = k[W(\omega_c \varphi_c - \omega_p \varphi_p)] / V_c, \\ dp_p / dt = k[W(\omega_p \varphi_p - \omega_x(x_y) \varphi_x \pm \psi_{yk} \varphi_{yk} \pm \psi_{yt} \varphi_{yt}) - \\ - p_p(dx_y / dt)S_p] / (V_p - x_y S_y), \\ dp_x / dt = k[W(\omega_x(x_y) \varphi_x - \omega_{ax}(x_y) \varphi_{ax} - \psi_{kx} \varphi_{kx} \pm \psi_{yx} \varphi_{yx} \pm \\ \pm \psi_{yk} \varphi_{yk}) - p_x(dx_y / dt)S_x] / (V_x + x_y S_x). \end{cases} \quad (1)$$

Термодинамическая составляющая —

$$\begin{cases} d\theta_c / dt = k[W(\omega_c \varphi_c \Omega_c - \omega_p \varphi_p \Omega_p)] / V_c, \\ d\theta_p / dt = k[W(\omega_p \varphi_p \Omega_p - \omega_x(x_y) \varphi_x \Omega_x \pm \psi_{yk} \varphi_{yk} \Omega_{yk} \pm \\ \pm \psi_{yt} \varphi_{yt} \Omega_{yt}) + (k-1)p_p(dx_y / dt)S_p] / p_p(V_p - x_y S_p), \\ d\theta_x / dt = k[W(\omega_x(x_y) \varphi_x \Omega_x - \omega_{ax}(x_y) \varphi_{ax} \Omega_{ax} - \psi_{kx} \varphi_{kx} \Omega_{kx} \pm \\ \pm \psi_{yx} \varphi_{yx} \Omega_{yx} \pm \psi_{yk} \varphi_{yk} \Omega_{yk}) - (k-1)p_x(dx_y / dt)S_x] / p_x(V_x + x_y S_x). \end{cases} \quad (2)$$

Баромеханическая составляющая —

$$\begin{cases} d^2x_y/dt^2 = (p_x S_x - p_p S_p - F_{yt} - F_{yk}) / m_y & \text{при } x_y > 0, \\ d^2x_k/dt^2 = (p_x S_x - p_p S_p - F_{yt} - F_{kx} - F_{yk} - F_h) / m_y & \text{при } x_k > 0. \end{cases} \quad (3)$$

В (1), (2) и (3)  $S_p = S_y - S_t$ ,  $S_x = S_p$ .

Ограничения для бародинамических функций  $\varphi_c$ ,  $\varphi_p$ ,  $\varphi_x$ ,  $\varphi_{yk}$ ,  $\varphi_{yt}$ ,  $\varphi_{kx}$  приняты в виде зависимости Сен-Венана — Вантцеля:

$$\varphi_{ij} \equiv \varphi_{ji} = \begin{cases} 0,5283 > p_i / p_j & p_i \theta_i^{1/2} 0,2588, \\ 0,5283 \leq p_i / p_j & p_i \theta_i^{1/2} [(p_i / p_j)^{2/k} - (p_i / p_j)^{(k+1)/k}]^{1/2}, \\ 0,5283 > p_j / p_i & p_j \theta_j^{1/2} 0,2588, \\ 0,5283 \leq p_j / p_i & p_j \theta_j^{1/2} [(p_j / p_i)^{2/k} - (p_j / p_i)^{(k+1)/k}]^{1/2}. \end{cases} \quad (4)$$

В (4) индексы  $ij$  и  $ji$  обозначают направления истечения воздуха: при  $i$  — откуда и  $j$  — куда.

Ограничения для термодинамических функций  $\Omega_c$ ,  $\Omega_p$ ,  $\Omega_x$ ,  $\Omega_{yk}$ ,  $\Omega_{yt}$ ,  $\Omega_{kx}$  приняты в зависимости от  $\varphi_{ij}$  и  $\varphi_{ji}$  в следующем виде:

$$\Omega_{ij} \equiv \Omega_{ji} = \begin{cases} \varphi_{ij} > 0 & k-1, \\ \varphi_{ij} \leq 0 & k-(\theta_i / \theta_j), \\ \varphi_{ji} > 0 & k-1, \\ \varphi_{ji} \leq 0 & k-(\theta_j / \theta_i). \end{cases} \quad (5)$$

В (5) при изменении направлений истечения учитываются  $\varphi_{ij}$  и  $\Omega_{ij}$  или  $\varphi_{ji}$  и  $\Omega_{ji}$ .

Ограничения для перемещения ударника и корпуса:

$$\begin{cases} (dx_y/dt)_o = -k_y (dx_y/dt)_y & \text{при } x_y \leq 0, \\ (dx_k/dt)_o = -k_k (dx_k/dt)_y & \text{при } x_k \leq 0. \end{cases} \quad (6)$$

Ограничения для проходных сечений каналов (дресселей) впуска и перепуска:

$$\begin{cases} \omega_c \equiv \omega_p = \omega(p_i / p_j) \equiv \omega(p_j / p_i), \\ \psi_{yk} \equiv \psi_{yt} \equiv \psi_{kx} = \psi(p_i / p_j) \equiv \psi(p_j / p_i). \end{cases} \quad (7)$$

Согласно (7), работают зависимости (4) при  $\omega_i = \text{const}$  и  $\psi_i = \text{const}$ .

Ограничения для каналов выпуска  $\omega_{ax}(x_y)$  и перепуска  $\omega_x(x_y)$ :

$$\omega_{ax}(x_y) = \begin{cases} (d \cdot c) & \text{при } x_y \geq N, \\ 0 & \text{при } x_y \leq M, \\ (d \cdot c) \cdot 0,5 & \text{при } N > x_y > M; \end{cases} \quad (8)$$

$$\omega_x(x_y) = \begin{cases} (a \cdot b) & \text{при } x_y \leq 0, \\ 0 & \text{при } x_y \geq (K - P), \\ (a \cdot b) \cdot 0,5 & \text{при } (K - P) \cdot 0,5 \geq x_y > P. \end{cases} \quad (9)$$

В пневмоударном механизме рассматриваемого типа расход воздуха через проходное сечение дросселя  $\omega_{kp}$ , без учета утечек в атмосферу из объемов  $V_{kp}$ ,  $V_p$  и  $V_x$ , равен расходу воздуха на выпуске через проходное сечение  $\omega_x$  канала выпуска из камеры холостого хода с объемом  $V_x$ .

Расход воздуха на выпуске —

$$G_p = W \left[ \sum_{i=1}^n (R\theta)^{-1/2} (\omega_p(x_y) \varphi_p \Omega_p) \right] \quad (10)$$

и соответствующий —

$$G_x \equiv G_{ax} = W \left[ \sum_{i=1}^n (R\theta)^{-1/2} (\omega_x(x_y) \varphi_x \Omega_x) \right]. \quad (11)$$

Уравнения для  $G_p$  и  $G_{ax}$  позволяют уточнить (с отклонением до 6 %) расчетные расходы, соответствующие уравнениям (1)–(6).

На практике оперируют средним расходом [4] за  $n$  циклов (т. е. за интервал времени  $t = nT$ , где  $T$  — время одного цикла):

$$G_c = t_i^{-1} \int_{t_0}^{t_0 + t_i} G_i dt, \quad (12)$$

где  $t_i \gg T$  и  $t_0 = T$ .

**Рекомендации.** При предварительном моделировании рабочего процесса целесообразно: опустить в (1), (2) и (3) функции перетечек  $\psi_i$ ,  $\varphi_i$  и  $\psi_i$ ,  $\varphi_i$ ,  $\Omega_i$ ; геометрические размеры перепускных и выпускных каналов  $\omega_x(x_y)$  и  $\omega_{ax}(x_y)$  принять по форме прямоугольными (квадрат) или овальными (окружность); коэффициенты расходов на впуске, перепуске и выпуске принять равными единице ( $\mu_i = 1$ ), и пересчет на фактические значения произвести после определения рациональных параметров базовых геометрических размеров пневмоударного механизма.

**Выводы.** Предполагается уменьшение расхода воздуха и увеличение ресурса механизма в сравнении с известными механизмами, например, в навесных молотах.

Рассмотренный вариант принципиальной схемы механизма может быть применен в пневматических машинах ударного действия с различными сочетаниями энергии и частоты ударов с зависимыми от них массой и габаритными размерами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А б р а м е н к о в, Э.А. Пневматические механизмы машин ударного действия: дроссельные, струйные, беззолотниковые, бесклапанные: справ. пособие [Текст] / Э.А. Абраменков, Д.Э. Абраменков. — Новосибирск: Изд-во НГУ, 1993. — 430 с.
2. А б р а м е н к о в, Д.Э. Принципиальная схема пневмоударного механизма дроссельно-бесклапанного типа и его физико-математическое описание [Текст] / Д. Э. Абраменков, Э.А. Абраменков, В.А. Гвоздев, В.А. Канивец // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 5. — С. 65–71.
3. И д е л ь ч и к, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И.Е. Идельчик. — М. : Машиностроение, 1975. — 559 с.
4. А б р а м е н к о в, Э.А. Уравнения рабочего процесса дроссельного пневмоударного механизма [Текст] / Э.А. Абраменков // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1984. — № 4. — С. 110–115.

**АБРАМЕНКОВ Дмитрий Эдуардович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: abramenkovde@sgups.stu.ru**

*Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск  
АБРАМЕНКОВ Эдуард Александрович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: abramenkovde@sgups.stu.ru*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

**ГВОЗДЕВ Владимир Алексеевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: vizo@sibstrin.ru**

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

**КАНИВЕЦ Владислав Анатольевич, студ.**

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

**МАЛЫШЕВ Максим Сергеевич, студ.**

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено 11.07.14

**AbraMenkoV Dmitriy Eduardovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: abramenkovde@sgups.stu.ru, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

**AbraMenkoV Eduard Alexandrovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: abramenkovde@sgups.stu.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Gvozdev Vladimir Alexeevich**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: vizo@sibstrin.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Kanivets Vladislav Anatolievich**, student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Malyshev Maxim Sergeevich**, student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **PNEUMOSHOCK MECHANISM THROTTLE-VALVELESS TYPE AND ITS PHYSICAL-MATHEMATICAL DESCRIPTION**

Discusses the structure and principle of work synthesized air-percussion mechanism, based on the throttle distribution and provides its physical-mathematical foundations description.

**Key words:** pneumoshock mechanism, barodynamics, thermodynamics, air pressure, air flow, an inlet throttle, channel bypass.

### **REFERENCES**

1. A b r a m e n k o v, E.A. Pneumatic mechanisms of machines of shock action: throttle, jet, unspool, valveless. Reference manual [Text] / E.A. Abramakov, D.E. Abramakov. — Novosibirsk : Publishing house NSU, 1993. — 430 p.
2. A b r a m e n k o v, D.E. Schematic diagram of pneumoshock mechanism throttle-valveless type and physical mathematical description [Text] / D.E. Abramakov, E.A. Abramakov, V.A. Gvozdev, V.A. Kanivets // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2014. — N 5. — P. 65–71.
3. I d e l c h i k, I.E. Handbook of hydraulic resistance [Text] / I.E. Idelchik. — M. : Mashinostroenie, 1975. — 559 p.
4. A b r a m e n k o v, E.A. Equations workflow throttle pneumoshock mechanism [Text] / E.A. Abramakov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 1984. — N 4. — P. 110–115.

**УДК 621.873.15**

**Д.Д. КРАШЕНИННИКОВ**

## **К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БАШЕННЫХ КРАНОВ**

Рассмотрены основные технологические параметры башенных кранов (грузоподъемность, вылет стрелы, высота подъема крюка), показана целесообразность повсеместного учета наряду с базовыми критериями выбора крана дополнительных параметров (скорость рабочих движений, колея, задний габарит, конструктивная масса, глубина опускания груза, диапазон подъема).

**Ключевые слова:** башенный кран, технологические параметры, скорость рабочих движений, колея, задний габарит, конструктивная масса, глубина опускания груза, диапазон подъема.

Решение вопросов определения конструктивных и технологических параметров строительных кранов, как правило, всегда связано с разработкой стройгенпланов, технологических схем, когда необходимо знать конструктивные и технологические параметры монтажных машин и механизмов. Это касается как самоходных, так и башенных кранов.

Основными данными при выборе варианта механизации и определении типа и параметров монтажных кранов являются: конфигурация и размеры зданий; габариты, степень укрупнения, масса и расположение монтируемых конструкций, объем и заданные сроки выполнения монтажных работ, условия строительства (размеры строительной площадки и ее обеспеченность подъездными путями, электроэнергией, топливом, паром, сжатым воздухом, водой). В основном монтажные краны выбирают в зависимости от их грузоподъемности, вылета стрелы и высоты подъема крюка.

В настоящее время по вопросу определения параметров башенных кранов существует немалое количество пособий, методик и практических рекомендаций. Все они достаточно хорошо проработаны авторами, однако работа с ними затруднена в свою очередь тем, что информативно они разрознены и очень часто противоречивы. Кроме того, применяемые импортные башенные краны далеко не всегда соответствуют своим паспортным данным [1]. Все это негативно проявляется в условиях эксплуатации в виде потери устойчивости машин.

К основным параметрам башенных кранов следует отнести грузовой момент, вылет крюка, грузоподъемность и высоту подъема крюка. Наиболее полно характеризует параметры кранов грузовой момент, так как он учитывает такие основные параметры, как грузоподъемность и вылет, и поэтому для башенных кранов его принимают в качестве главного обобщенного параметра. По этому показателю строятся многочисленные ряды башенных кранов [2].

К дополнительным параметрам, определяющим технический уровень кранов, относят скорость рабочих движений, колею, задний габарит, конструктивную массу.

Вылетом крюка  $L$  называют расстояние по горизонтали от оси вращения поворотной части крана до вертикальной оси грузозахватного органа. При выборе вылета необходимо учитывать конструктивные формы возможного сооружения, которые являются определяющими при выборе того или иного крана, или вновь проектируемого крана [3]. Однако для приставных и самоподъемных кранов, занятых на строительстве линейно протяженных зданий, вылет крюка может быть зависим от числа установленных кранов и от необходимого темпа строительства, определяемого фронтом работ.

При вычислении максимального вылета крюка  $L_0$  для передвижных кранов следует учитывать наибольшую приведенную величину  $B$  здания (с учетом балконов, сдвижки секций и пр.), безопасное расстояние  $A$  от оси кранового пути до здания и запас по вылету  $\Delta l = 1,5 + 2$  м, необходимый для облегчения и ускорения наводки груза к месту монтажа, увеличения фронта работ (рис. 1).

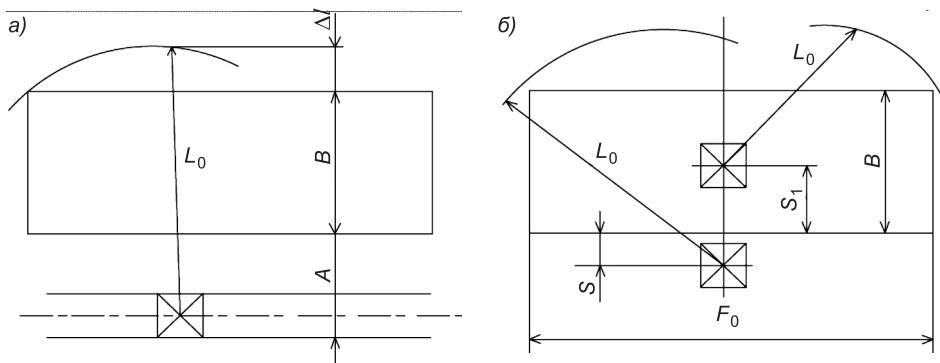


Рис. 1. Схема определения максимального вылета крюка для передвижных (а), приставных и самоподъемных кранов (б)

Максимальный вылет для передвижных кранов будет равен:

$$L_0 = A + B + \Delta l. \quad (1)$$

Безопасное расстояние от оси крана до наиболее выступающих частей здания (балкон, карнизы) обычно принимают различным образом. Так, для кранов с нижним расположением противовеса он равен заднему габариту плюс безопасный зазор 0,7–1 м. При использовании таких кранов противовес должен быть расположен выше сооружения, чтобы при вращении крана он мог свободно проходить над зданием.

Если высота расположения противовеса меньше высоты здания, то должны быть приняты меры, исключающие возможности поворота противовеса в сторону здания как в рабочем, так и в нерабочем состояниях крана, или безопасное расстояние должно быть на 0,7–1 м больше заднего габарита противовесной консоли. Для приставных и самоподъемных кранов, предназначенных для обслуживания протяженных зданий, вылет крюка зависит от числа установленных на здании кранов и необходимого

темпа строительства. Однако чаще всего считают, что вылет целесообразно определять в зависимости не только от параметров здания, но и от темпа строительства.

Учитывая опыт эксплуатирования передвижных и приставных кранов, фронт  $F_0$  обслуживания зданий приставными и самоподъемными кранами целесообразно принимать равным 60 м. Это вместе с повышением скоростей рабочих движений позволит обеспечить и заданный темп строительства. С учетом принятого размера фронта работ максимальный вылет для приставных кранов будет равен:

$$L_0 \geq \sqrt{\left(\frac{F_0}{2}\right)^2 + (B+S)^2}, \quad (2)$$

для самоподъемных кранов:

$$L_0 \geq \sqrt{\left(\frac{F_0}{2}\right)^2 + (B-S_1)^2}, \quad (3)$$

где  $S$  и  $S_1$  — расстояние от оси вращения крана до ближайшей стены здания.

Фактически при подъеме груза вылет будет превышать паспортное значение из-за деформации основания и крана в целом. В ряде зарубежных стран паспортные параметры кранов принимают с учетом деформации конструкций. При максимально поднятой стреле это дает возможность повысить паспортные показатели крана (вылет на 1–1,5 м, грузовой момент — на 5–10 %) и снизить металлоемкость крана [4].

Минимальный вылет для крана с балочными стрелами устанавливают по конструктивным соображениям, исходя из условий приближения грузовой тележки к башне крана. Он зависит от размеров башни и грузовой тележки. Обычно это от 2,5 до 5 м. У кранов с подъемными стрелами минимальный вылет обусловлен длиной стрелы. Его можно определить, исходя из расчета стрелы против запрокидывания. У кранов со свободно подвешенной стрелой минимальный вылет может быть равен  $0,5L_0$ , если средняя скорость изменения вылета находится в пределах 15–20 м/мин. При скорости изменения вылета 5–8 м/мин минимальный вылет может быть  $0,3L_0$ .

Под грузоподъемностью крана понимается максимально допустимая масса рабочего груза, поднимаемого краном на данном вылете. Грузовой момент соответствует произведению вылета грузозахватного органа и соответствующей ему грузоподъемности крана. Четкое определение понятия грузоподъемности имеет большое значение, так как в ряде стран (США, Англия и др.) в грузоподъемность включают массу крюковой подвески и канатов грузового полиспаста. Это позволяет зарубежным фирмам в ряде случаев повышать формально паспортную грузоподъемность на 10 % и более. Кроме того, в указанных странах грузоподъемность выражается не в метрических, а в коротких тоннах (shot ton), равных 907 кг. Данное обстоятельство часто при переводе с английского не учитывают и sh.t переводят как метрическую тонну, что приводит к еще

большему завышению (на 10 %) паспортного значения грузоподъемности зарубежных кранов [5].

Таким образом, нечеткость в определении понятия грузоподъемности может приводить к общему завышению грузоподъемности зарубежных кранов на 20 % и, как следствие, к соответственному снижению их металлоемкости.

При проектировании новых кранов максимальную грузоподъемность устанавливают в соответствии с наибольшей массой поднимаемых элементов. На промежуточных, в том числе и на максимальных вылетах, грузоподъемность определяют в общем случае по параболическому закону, исходя из постоянства грузового момента ( $M = \text{const}$ ). Если масса строительных элементов возводимого здания по всей площади застройки имеет постоянное значение, нет необходимости в повышении грузоподъемности крана на минимальном вылете. В этом случае грузоподъемность принимают постоянной на всех вылетах, что позволяет уменьшить диаметр каната, блоков, барабанов и снизить тем самым конструктивную массу крана по сравнению с кранами, имеющими переменную грузоподъемность. С этой же целью на многих кранах ограничивают максимальную грузоподъемность на части вылета значением, установленным требованиями строительства.

Высотой подъема  $H$  называют расстояние от уровня кранового пути (для самоподъемных кранов — от основания сооружения) до центра его крюка, находящегося в верхнем рабочем положении. Поскольку краны могут работать с грузами и ниже стоянки (монтаж фундамента — для передвижных кранов, взятие со склада или с транспорта — для само-подъемных), им свойственны такие параметры, как глубина опускания и диапазон подъема [3].

Под глубиной опускания понимают расстояние по вертикали от уровня стоянки крана до грузозахватного органа, находящегося в нижнем рабочем положении. Диапазон подъема устанавливают как расстояние по вертикали между верхним и нижним рабочими положениями грузозахватного органа [6].

Таким образом, при выборе высоты башни определяющим является высота сооружения, а при выборе канатоемкости барабана грузовой лебедки — диапазон подъема.

Для передвижных кранов глубина опускания оговорена нормативами, в соответствии с которыми при вычислении высоты  $H$  подъема во вновь проектируемых кранах следует учитывать возможность беспрепятственного монтажа верхнего этажа и плит кровли.

На рис. 2 приведены необходимые высоты подъема крюка для кранов с балочной стрелой при монтаже стен верхнего этажа и плит кровли.

Для кранов с подъемной стрелой, а также с балочной стрелой с изменяемым углом наклона высота подъема при максимальном вылете может быть снижена путем использования запаса вылета при работе с поднятой стрелой. При этом минимальную высоту подъема определяют по условиям приближения стрелы к передней стене здания на безопасное расстояние  $\delta$  (не менее 0,5 м). Отсюда следует:

$$H_{\text{ш}} = H_{\text{зд}} + h_{\text{кр}} + \frac{\delta + 0,5h_c}{\cos \alpha} - [A - (b_6 + b_c) \operatorname{tg} \alpha], \quad (4)$$

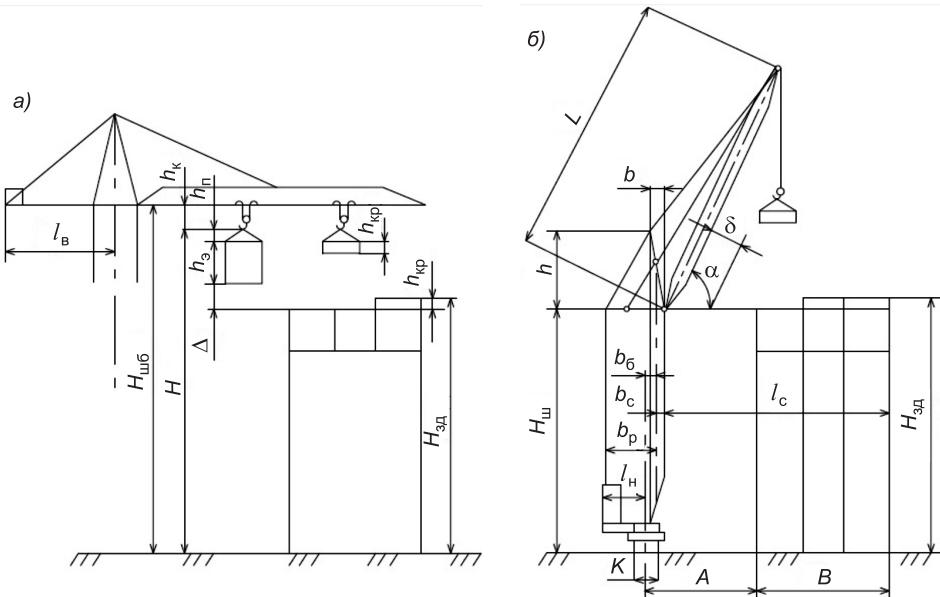


Рис. 2. Схема определения высоты подъема крюка при монтаже стен верхнего этажа (а) и плит кровли (б)

$$H = H_{шб} + L \sin \alpha - h_k, \quad (5)$$

где \$h\_c\$ — высота сечения стрелы, для предварительных расчетов \$h\_c = 1\$ м;  
\$H\_{шб}\$ — высота шарнира стрелы;  
\$H\_{шд}\$ — высота здания (от уровня земли);  
\$h\_{кп}\$ — высота монтируемой плиты;  
\$A\$ — расстояние от оси кранового пути до здания;  
\$b\_0\$ — расстояние от оси кранового пути до оси башни;  
\$b\_c\$ — расстояние от шарнира стрелы до шарнира башни;  
\$L\$ — длина стрелы;  
\$h\_k\$ — высота крюковой подвески крана;  
\$\alpha\$ — угол наклона стрелы.

Принимая \$\cos \alpha = 1\$, получим:

$$H_{шб} = H_{шд} - (A - b_0 - b_c) \sqrt{\left(\frac{L}{l_c}\right)^2 - 1}, \quad (6)$$

$$H = H_{шб} + 0,26L - 2, \quad (7)$$

где \$l\_c = A + B - b\_0 - b\_c\$ — расстояние от шарнира стрелы до задней стены здания. При этом должно быть соблюдено условие:

$$H_{шб} \geq H_{шд} + 8 - \sqrt{L^2 - l_c^2}. \quad (8)$$

У кранов с подъемной стрелой \$H\_{шб}\$ может быть значительно ниже, чем у кранов с балочной стрелой на величину:

$$\Delta H_{шб} = H_{шб} - H_{шд} = (A - b_0 - b_c) \sqrt{\frac{L^2}{l_0^2} - 1} + 8 \text{ (м).} \quad (9)$$

В исключительных случаях имеется возможность строительства и при меньшей высоте подъема, чем определено по формуле, т.е. строительство методом возведения последнего этажа «на себя»: сначала монтируют наиболее удаленные от крана элементы, а затем возводят ближние части здания.

В заключение стоит отметить, что проведенный анализ технологических параметров башенных кранов показал целесообразность повсеместного учета наряду с базовыми параметрами крана дополнительных параметров, к которым относятся: скорость рабочих движений, колея, задний габарит, конструктивная масса, глубина опускания груза, диапазон подъема. Кроме того, учитывая стремительный научный прогресс в области строительства, следует считать, что рассматриваемый вопрос требует дополнительных исследований.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мосаков, Б.С. Механизация и автоматизация строительных процессов [Текст] / Б.С. Мосаков, В.Л. Курбатов. — М. : Промышленность-1, 2009. — 356 с.
2. Мосаков, Б.С. Технология возведения зданий и сооружений [Текст] / Б.С. Мосаков, В.Л. Курбатов, В.В. Молодин. — Новосибирск : СГУПС, 2013. — 244 с.
3. Александров, М.П. Грузоподъемные машины: учеб. для вузов [Текст] / М.П. Александров. — М. : Высш. шк., 2000. — 552 с.
4. Абраменков, Д.Э. Средства механизации строительства, реконструкции и реставрации зданий, сооружений [Текст] / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков, В.В. Грузин. — Новосибирск : ФАОРФ, 2006. — 320 с.
5. Хальфин, М.Н. Грузоподъемные машины для монтажных и погрузочно-разгрузочных работ [Текст] / М.Н. Хальфин, А.Д. Кирнев, Г.В. Несветаев, А.А. Козынко. — Ростов н/Д : Феникс, 2006. — 608 с.
6. Мосаков, Б.С. Эргономика строительных машин [Текст] / Б.С. Мосаков, Д.Д. Крашенинников // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. науч. тр. XI Междунар. науч.-практ. конф. — Курск, 2014. — С. 107–112.

*КРАШЕНИННИКОВ Дмитрий Дмитриевич, асп., E-mail: tiefsee@yandex.ru  
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск*

Получено 10.07.14

**Krasheninnikov Dmitriy Dmitrievich**, post-graduate student, E-mail: tiefsee@yandex.ru, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

#### **THE PROBLEM OF DEFINITION TOWER CRANES OF CONSTRUCTIONAL AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS**

The main technological parameters of tower cranes (capacity, boom, hook height), the expediency of widespread accounting along with the basic selection criteria tap additional parameters (speed of movement of workers, track, rear lamp, structural weight, lowering height, lifting range).

**Key words:** tower crane, process parameters, the rate of labor movements, track, rear lamp, structural weight, lowering height, lifting range.

REFERENCES

1. Mosakov, B.S. Mechanization and automation of construction processes [Text] / B.S. Mosakov, V.L. Kurbatov. — M. : Industry-1, 2009. — 356 p.
  2. Mosakov, B.S. Technology of construction of buildings and structures [Text] / B.S. Mosakov, V.L. Kurbatov, V.V. Molodin. — Novosibirsk : STU, 2013. — 244 p.
  3. Alexandrov, M.P. Lifting machines : textbook for high schools [Text] / M.P. Alexandrov. — M. : High school, 2000. — 552 p.
  4. Abramenchikov, D.E. Means of mechanization of construction, reconstruction and restoration of buildings, structures [Text] / D.E. Abramenchikov, E.A. Abramenchikov, V.V. Gruzin. — Novosibirsk : FAORF, 2006. — 320 p.
  5. Khalpin, M.N. Hoisting machines for assembly and handling operations [Text] / M.N. Khalpin, A.D. Kearney, G.V. Nesvetaev, A.A. Kozynko. — Rostov-on-Don : Phoenix, 2006. — 608 p.
  6. Mosakov, B.S. Ergonomics construction machinery [Text] / B.S. Mosakov, D.D. Krasheninnikov // Modern instrumented systems, information technology and innovation: a collection of scientific papers XI-th International scientific and practical conference. — Kursk, 2014. — P. 107–112.
-

**УДК 621.879**

**В.Н. КУЗНЕЦОВА, В.В. САВИНКИН**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ЭКСКАВАЦИОННОГО ЦИКЛА ЗЕМЛЕРОЙНОЙ МАШИНЫ**

Аналитически определены значения затраченной работы на преодоление рабочим оборудованием экскаватора сил сопротивления при энергоемких процессах и обоснованы наиболее нагруженные элементы рабочего оборудования экскаватора.

Разработана математическая модель, с помощью которой доказана зависимость КПД гидропривода от возникающего максимального усилия при копании ковшом, учитывающая динамические характеристики гидропривода. Обоснована зависимость изменения энергоемкости на всех этапах резания.

**Ключевые слова:** энергоемкость, динамические характеристики, работа, гидропривод.

В [1] доказано, что геометрические характеристики рабочего органа экскаватора оказывают существенное влияние на степень загруженности гидропривода и его технологические характеристики. Модель конструктивно-технологической системы «рабочий орган — среда» обеспечивает максимально эффективное усилие, необходимое для преодоления сопротивления резанию грунта. Сохранение условия неравенства сил сопротивлений и сил резания грунта  $R_c < R_p$  зависит от геометрических характеристик рабочего оборудования, места концентрации напряжений, величины моментов изгиба (элементов ковша, рукояти и стрелы), динамических нагрузок и др.

Геометрия ковша задает условия и пределы характеристик энергоэффективной работы гидроцилиндров рабочего оборудования, а также технических и технологических параметров гидропривода и его элементов [1]. В связи с чем поставлена цель исследований — обосновать конструктивно-технологический потенциал строительно-дорожных машин (СДМ) по повышению энергоэффективности гидропривода.

Поставленная цель определила следующие задачи:

- обосновать факторы, влияющие на энергоемкость гидропривода;
- исследовать энергию, затраченную гидроприводом на всех этапах экскавационного цикла при разном позиционировании рабочего оборудования;
- обосновать зависимость энергоэффективности гидропривода от технологических характеристик силового гидродвигателя;
- определить наиболее энергонагруженные элементы гидропривода.

Для разработки конструктивно-технологических мероприятий по энергоэффективности гидропривода необходимо исследовать работу, затрачиваемую рукоятью на преодоление сопротивлений грунта копанию. На данном этапе считаем важным максимально учесть факто-

ры, влияющие на полную работу, совершающую ковшом: удельное сопротивление грунта копанию  $k_1$ ; коэффициент энергоемкости, применяемый в стандартных расчетах, не дает полной картины эффективного использования энергии. Наиболее адекватно опишет закон изменения энергоемкости на всех этапах резания ранее разработанная математическая модель КПД гидропривода от возникающего максимального усилия  $\eta_{\text{общ}} = 0,00002R_k^2 - 0,0073R + 1,1075$  при сопротивлении копанию ковшом; вместимость ковша  $q$ ; оптимальная глубина копания  $H_p$ ; угол наклона откоса безопасности к уровню стоянки экскаватора  $\tau$ ; радиус, описываемый при повороте ковша режущей кромкой зуба  $R_1$ . При исследовании динамических характеристик гидропривода считаем, что  $R_1$  целесообразно выразить через ход поршня  $S_n$ . Именно этот показатель при построении математической модели позволит учесть затрачиваемое усилие на каждом промежутке отрезка при повороте ковша на  $n^0$  по аналитической зависимости  $S_n = 0,00002R_k^{2,0674}$ .

$$A_p = k_1 \eta_{\text{общ}} q \left( 1 - \frac{S_n(1 - \cos \tau)}{H_p} \right), \quad (1)$$

где  $k_1 = 227$  кПа — удельное сопротивление грунта копанию;  
 $\eta_{\text{общ}}$  — КПД гидропривода при работе ковшом при максимальном сопротивлении грунта  $\eta_{\text{общ}} = 0,74$ ;  
 $q$  — вместимость ковша  $q = 1,4 \text{ м}^3$ ;  
 $R_1 = 0,459 \sqrt[3]{N_{\text{ном}}^{\text{гр}}} + 0,264$  — радиус, описываемый при повороте ковша режущей кромкой зуба, выразим через ход поршня  $S_n = 0,00002R_k^{2,0674}$  при максимально затрачиваемой мощности на преодоление сопротивления резанию грунта  $S_n = 1,35 \text{ м}$ ;  
 $H_p = 4,84$  — оптимальная глубина копания, м;  
 $\tau$  — угол наклона откоса безопасности к уровню стоянки экскаватора  $\tau = 75^\circ 30'$ ;

$$A_p = 227 \cdot 0,74 \cdot 1,4 \cdot \left( 1 - \frac{1,37(1 - \cos(75,5^\circ))}{4,84} \right) = 185,2 \text{ кДж.}$$

При динамическом нагружении на величину работы  $A_G$  (кДж), затрачиваемой на преодоление сил тяжести рабочего оборудования и грунта в ковше, существенно влияют силы тяжести каждого элемента навесного оборудования<sup>1</sup>.

В стандартных проектировочных расчетах [2] массу ковша  $m_k$  (т) ориентировочно принимают пропорциональной его вместимости  $q$  ( $\text{м}^3$ ), т.е.  $m_k = m_{\text{куд}}q$ , где  $m_{\text{куд}}$  — удельная масса (приходящаяся на единицу вместимости), принимаемая равной  $0,85 \text{ т}/\text{м}^3$  с учетом плотности материала. При вместимости ковша  $q = 1,4 \text{ м}^3$  при разработке грунта плотностью  $\rho = 1,8 \text{ т}/\text{м}^3$  при общем назначении экскаваторов Komatsu PC300 с эксплуатационной массой  $m_s = 32 \text{ т}$   $m_k = 0,85 \cdot 1,4 = 1,19 \text{ т}$ .

<sup>1</sup> Крикун В.Я., Манасян В.Г. Расчет основных параметров гидравлических экскаваторов с рабочим оборудованием обратная лопата. М.: Изд-во АСВ, 2001.

Массы металлоконструкции рукояти  $m_p$  (т) и стрелы  $m_c$  (т) определим приближенно по подобию, но удельную массу металлоконструкций  $m_{уд}$  примем из расчета на 1 п.м  $m_{уд} = 0,27$  при  $m_s = 32$  т.

$$m_p = 1,2 \cdot m_{уд} l_p \text{ и } m_c = 1,1 \cdot m_{уд} l_c,$$

$$m_p = 1,2 \cdot 0,27 \cdot 2,55 = 0,83 \text{ т; } m_c = 1,1 \cdot 0,27 \cdot 5,7 = 1,693 \text{ т.}$$

Массу грунта в ковше определим как:

$$m_r = \rho q = 1,8 \cdot 1,4 = 2,52 \text{ т.}$$

Другие авторы для установления затрачиваемой энергии гидропривода на разработку грунта учитывают силы тяжести рабочего оборудования и воздействия  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ . Все эти показатели условные и относятся больше к расчету конструктивно-технологических параметров в статической системе. Поэтому здесь в качестве более точного представления примем динамический фактор  $D_p$ , учитывающий инерцию и силы сопротивления.

$$G_p = \frac{m_p g}{D_p}. \quad (2)$$

Аналогично рассчитываем силы тяжести стрелы, ковша и грунта в ковше.

Эффективная работа, осуществляемая гидроприводом, будет производиться лишь в ограниченном пространстве забоя. Координаты позиций оборудования будут соответствовать минимальным силам сопротивления резанию грунта и минимальному влиянию инерционных и динамических составляющих (рис. 1).

При исследовании нагруженности гидроцилиндра рукояти была принята модель, которая учитывала потери на трение и режимы, в которых он эксплуатируется (зачерпывание и выгрузка грунта). Фактическое усилие на штоке гидроцилиндра определяли в зависимости от схемы включения. В известных методиках потери при перемещении жидкости от насоса к гидроцилинду принимают примерно 10 % от номинального, создаваемого насосом [2]. Реальные условия эксплуатации не приемлют приближенность в 10 %, так как давление в напорной и сливной полостях значительно изменяется при разных режимах работы и тахтах экскавационного цикла «подъем — опускание». Так, для режима выемки грунта, учитывая потери давления при местных сопротивлениях  $\xi$  (штуцеры, фильтры и т.д.) трубопроводов  $\lambda$  (гибкие и жесткие), усилие, создаваемое на штоке гидроцилиндра, рассчитаем из выражения:

$$A_G = (G_k + G_r) h_{\max k} + G_p h_p + G_c h_c; \quad (3)$$

$$R_u^3 = [(P_{\text{ном}} - \Delta P_n) F_n - \Delta P_{\text{сл}} F_w] \eta_{\text{гм.ц}}, \quad (4)$$

где  $P_{\text{ном}}$  — номинальное давление насоса;

$\Delta P_n$  и  $\Delta P_{\text{сл}}$  — гидравлические потери соответственно в напорной и сливной гидролиниях (определенены в работе ранее);

$F_n$  — площадь поршня;

$F_w$  — площадь штока;

$\eta_{\text{гм.ц}}$  — гидромеханический КПД гидроцилиндра.

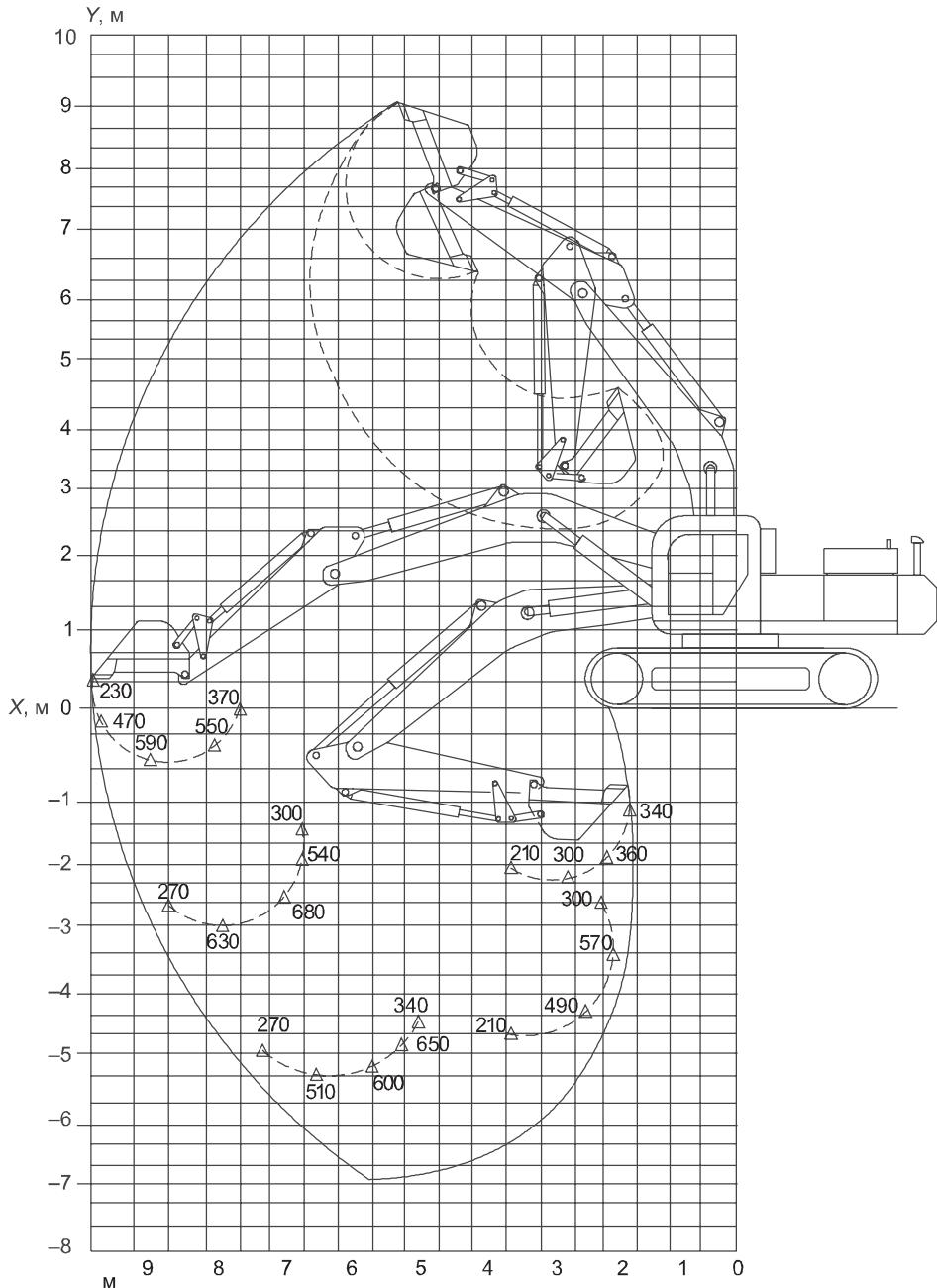


Рис. 1. Возможные значения усилий сопротивления резанию грунта, кН, при различном позиционировании зуба ковша экскаватора

Работу гидроцилиндра рукояти  $A_{\text{гц}}$  в заданных условиях и режимах представляем как произведение усилия на штоке  $R_{\text{ц}}$  на ход поршня  $S_{\text{п}}$  [2]. Усилие на штоке гидроцилиндра рукояти при такте выгрузки грунта из ковша составит  $R_{\text{ц}}^{\text{в}} = 67 \text{ кН}$  и  $A_{\text{гц}} = 122 \text{ кДж}$ .

Аналитические исследования показали, что один из энергоемких тактов — зачерпывание грунта ковшом. Работа, затрачиваемая на преодоление сопротивлений грунта копанию поворотом ковша с учетом изменчи-

вости толщины грунтовой стружки, твердых включений и нородных тел ( $\xi = 1,2$  для глин и суглинков) и пространственного положения оборудования, определит критерий эффективной энергии гидропривода и его силовых гидродвигателей:

$$A_k = k_1 \eta_{\text{общ}} q \xi. \quad (5)$$

Энергоэффективность работы гидропривода определяется возможностью преодолевать сопротивление грунта копанию в крайних положениях ковша равными усилиями на штоке гидроцилиндра. Неудовлетворение этому требованию приводит к перегрузке гидроцилиндра в ответственном положении и недоиспользованию его силового запаса в другом положении.

При исследовании работы, затраченной на преодоление рабочим оборудованием экскаватора сил сопротивления при энергоемких процессах, установлено, что наиболее нагруженными элементами являются ковш и рукоять экскаватора (см. рис. 1). Значительные нагрузки возникают в гидроцилиндре поворота ковша при максимальной глубине и максимальной высотекопания относительно уровня стояния. Если наибольшее усилие на режущей кромке ковша не может быть достигнуто из-за ограниченной устойчивости экскаватора (ограниченной откосом безопасности) или ограничения реактивного усилия в гидроцилиндре рукояти, то в известных методиках рекомендуют за расчетное принимать положение, при котором рукоять повернута на угол, допускающий развитие максимального усилия на режущей кромке ковша, что соответствует расчетному положению рукояти  $P_{3p}$  (см. рис. 1) и ковша  $P_{3k}$  (рис. 2).

При установлении действующих на рукоять и ковш полезных сил, реактивных сил и моментов в известных методиках [2], основанных на законах теоретической механики, учитывают угол поворота исследуемого

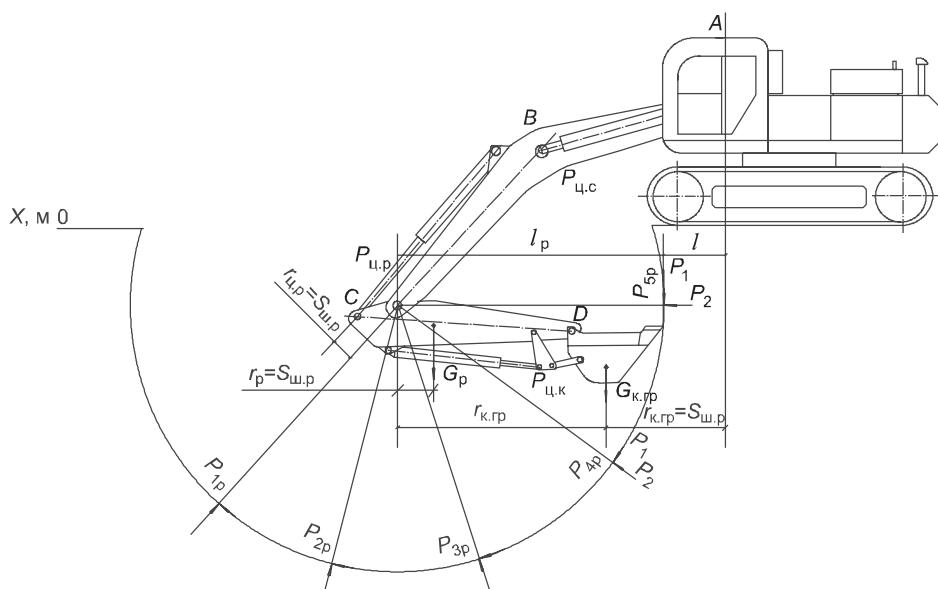


Рис. 2. Схема к определению усилий, действующих на рабочее оборудование экскаватора

объекта, и это справедливо. Однако неопровергимый факт, что нагрузку, реакцию сил и моменты создает не только среда взаимодействия (грунт) и собственные массы ( $G_i$ ), но и силовые гидродвигатели (гидроцилиндры). При максимально нагруженном рабочем цикле на силовые характеристики влияют геометрические параметры и координатные точки ковша в заданном пространстве.

Для объективности исследования зависимости силовых составляющих гидродвигателя и рабочего оборудования предлагаем основываться не на угловом перемещении в пространстве изучаемого элемента конструкции, а на величине хода штока гидроцилиндра (ковша, рукояти, стрелы). Адекватность данного показателя обосновывается зависимостью величины выхода штока  $S_{ш}$  из цилиндра от создаваемого усилия  $R$  на нем в процессе эксплуатации  $S_{ш} = 0,00002R^{2,0674}$ .

Например. Реактивное усилие, возникающее в цилиндре рукояти в положении  $P_{5p}$  (см. рис. 2), определим из выражения:

$$\begin{aligned} \Sigma M_B &= 0; \\ -P_{цр5}(r_{цр5}) + G_{к.гр}(r_{к.гр5}) + G_p(r_{p5}) + P_{cp}(\rho) &= 0; \\ P_{цр7} &= \frac{1}{S_{ш.ц.к}} = 0,00002R_k^{2,0674} (G_{к.гр}(S_{ш.ц.р5}) + \\ &+ G_p(S_{ш.ц.к.гр5}) + P_{cp}(S_{ш.ц.р5} + S_{ш.ц.к.гр5})). \end{aligned} \quad (6)$$

Как известно, динамическими звенями рабочего оборудования являются гидроцилиндры, которые задают относительное движение стрелы, рукояти и ковша. Полученные выражения эффективной работы и сил сопротивлений в гидроцилиндрах можем справедливо отнести к математической модели энергоемкости рабочего оборудования экскаватора.

Таким образом, длина выхода штока (м) будет характеризовать координаты расположения ковша и (или) рукояти, а также усилие, действующее на данный гидроцилиндр (табл. 1). Характер и причины изменения кривой описаны нами ранее.

Аналитически установлено, что максимальное реактивное усилие в цилиндре рукояти будет возникать в положении  $P_5$ . Усилие (кН), развиваемое на режущей кромке в положении  $P_{n-i}$  при  $S_{ш-i}$ , представлено в табл. 2 и на рис. 3.

**Выводы.** Основные факторы, влияющие на энергоемкость гидропривода, — удельное сопротивление грунта копанию  $k_1$ ; КПД гидропривода  $\eta_{общ} = 0,00002R^2 - 0,0073R + 1,1075$ , учитывающий изменение максимального усилия при сопро-

Таблица 1. Реактивное усилие, возникающее в цилиндре рукояти в положении  $P_n$  при  $S_{ш}$ , кН

Позиция	Положение	$S_{ш}$
1	$P_{ц1}^p$	298,6
2	$P_{ц2}^p$	258
3	$P_{ц3}^p$	251
4	$P_{ц4}^p$	280,8
5	$P_{ц5}^p$	330,3

Таблица 2. Усилие, развиваемое на режущей кромке в положении  $P_{n-i}$  при  $S_{ш-i}$ , кН

Позиция	Положение	$S_{ш-i}$
1	$P_{ц1-5}^k$	56,8
2	$P_{ц1-3}^k$	81,3
3	$P_{ц1-1}^k$	64,5

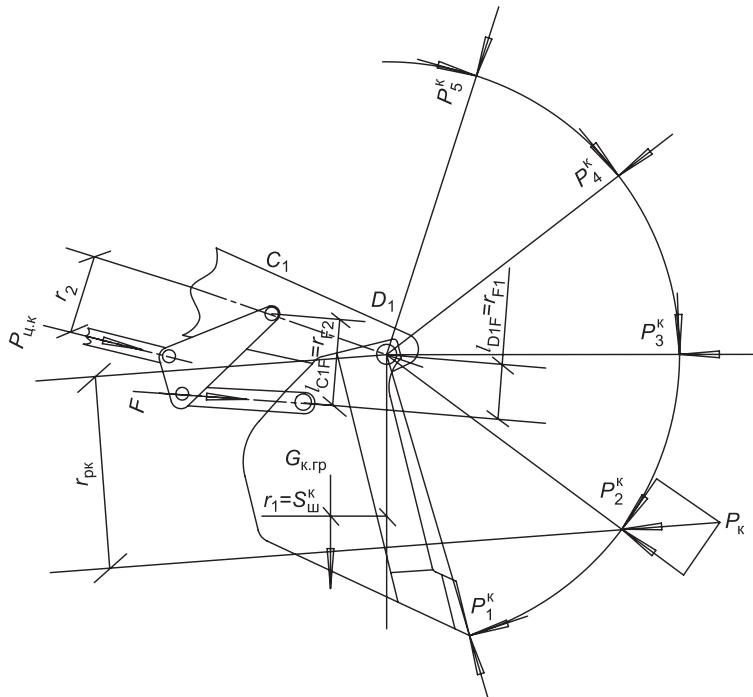


Рис. 3. Схема к определению усилий в тяге ковша

тивлении копанию ковшом; динамические и технологические характеристики силового гидродвигателя.

Разработана методика анализа энергоемкости гидропривода рабочего оборудования экскаватора; получены математические модели исследования энергетических и силовых характеристик рабочего оборудования при разработке грунта (заглубление, подъем и опускание) в разных точках позиционирования.

Наиболее энергонагруженные элементы гидропривода — рукоять и силовые гидродвигатели рукояти и ковша. Усилие на режущей кромке ковша для положения  $P_{цл-3}^k = 81,31$  кН, данное значение будет максимальным, так как в этом положении будет максимальным плечо гидроцилиндра рукояти относительно шарнира, а действие полезных сил гидродвигателя сводится к минимуму.

Следовательно, важной инженерной задачей является использование потерь энергии за счет сил сопротивления и статической нагрузки. Тенденция развития методов и средств управления гидрофицированными машинами обуславливает необходимость в совершенствовании теории и практики применения методов рекуперации энергии гидравлической жидкости, что позволит более качественно использовать потенциал СДМ и повысить основные эксплуатационные показатели для заданного цикла работ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецова, В.Н. Обоснование критериев оценки эффективности экскаватора KOMATSU PC300 [Текст] / В.Н. Кузнецова, В.В. Савинкин // Строительные и дорожные машины. — 2014. — № 3. — С. 9–12.

2. Герасимов, Ю.Ю. Оптимизационный расчет параметров гидравлических механизмов привода манипулятора лесной машины [Текст] / Ю.Ю. Герасимов, В.С. Сюнев, А.П. Соколов // Строительные и дорожные машины. — 2006. — № 12. — С. 26–32.

**КУЗНЕЦОВА Виктория Николаевна, д-р техн. наук, проф.; E-mail: dissovetsibadi@bk.ru**

*Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ), г. Омск*

**САВИНКИН Виталий Владимирович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: cavinkin7@mail.ru**

*Северо-Казахстанский государственный университет им. М. Козыбаева, г. Петропавловск, Казахстан*

Получено после доработки 28.07.14

**Kuznetsova Victoriya Nikolaevna**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: dissovetsibadi@bk.ru, Siberian State Academy of Automobile and Road, Omsk, Russia

**Savinkin Vitaly Vladimirovich**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: cavinkin7@mail.ru, North Kazakhstan State University named of M. Kozybaev, Petropavlovsk, Kazakhstan

## **STUDY OF QUANTA ENERGY CONSUMPTION FOR EXCAVATING CYCLE OF EARTH-MOVING MACHINE**

Analytically determined the values of the work that is spent by excavator working equipment to overcome forces of resistance in energy-intensive processes and determined the most loaded elements of excavator working equipment.

The mathematical model is developed, which proved the dependence of efficiency of hydraulic drive from maximal efforts at resistance of bucket digging, taking into account the dynamic characteristics of hydraulic drive. Determined the dependence of energy consumption changes at all stages of cutting.

**Key words:** energy consumption, dynamic characteristics, work, hydraulic drive.

### **REFERENCES**

1. Kuznetsova, V.N. Confirmation of criteria of estimation of efficiency of the excavator KOMATSU PC300 [Text] / V.N. Kuznetsova, V.V. Savinkin // Building and road machines. — 2014. — N 3. — P. 9–12.
2. Gerasimov, Yu.Yu. Optimization calculation of parameters of hydraulic drive mechanisms of forest machines manipulator [Text] / Yu.Yu. Gerasimov, V.S. Synev, A.P. Sokolov // Building and road machines. — 2006. — N 12. — P. 26–32.

## **НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ**

**УДК 711.4.01**

**А.Е. ГАШЕНКО**

### **ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛОКАЛЬНО-ЦЕЛОСТНОГО ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

Приводится системное описание единицы городской структуры, в авторской трактовке получившей наименование локально-целостного градостроительного образования. Новый термин позволяет обобщить такие функционально и типологически разрозненные понятия, как, например, квартал, промышленный узел, железнодорожная станция, спортивный комплекс, свалка, микрорайон, студгородок, кладбище и другие элементы городского пространства с устоявшимися границами. Предлагается теоретическая модель такой системы. Даётся классификация элементов и связей, принципов их соотнесения. Устанавливается фрактальный характер модели, что подтверждает тезис о системной организации городского пространства.

**Ключевые слова:** городская среда, застройка, целостность, модель.

Моделирование пространственной среды города — одно из актуальных направлений теоретических и прикладных исследований. В отечественной градостроительной науке морфология города рассматривалась чаще всего с позиций истории градостроительного искусства — как проявление характерных приемов организации застройки, соответствующих той или иной вехе в развитии общества. В связи с этим описание архитектурно-градостроительной формы было акцентировано на наиболее ярких ее примерах — отдельных зданиях, доминантах, ценных исторических комплексах. До недавнего времени городская морфология не была объектом системных исследований. Лишь с конца 1980-х гг. с внедрением автоматизации и вычислительной техники стал развиваться системный подход к изучению градостроительной формы [1]. Одновременно с этим в профессиональной среде менялось отношение к градостроительному наследию.

Если еще в середине XX в. под культурным наследием понимались лишь единичные объекты, уникальные комплексы и территории, то к сегодняшнему дню архитекторы все больше говорят о ценности (хотя бы в научных интересах) каких бы то ни было пространственных форм, безотносительно к их архитектурно-художественным качествам. Внимание устремляется к феномену микрорайона, соцгорода, районам малоэтажной застройки [2]. Среди населения также повышается интерес к описанию территории посредством картографических сервисов, таких как «народные» Яндекс-карты, OpenStreetMaps и Wikimapia (в России это явление объясняется еще и продолжающимся процессом перехода к частной

собственности, когда контроль над территорией задается и путем ее наименования — посредством указанных карт).

Таким образом, возникают предпосылки для системного изучения морфологии города, понимания структуры городской ткани, нахождения характерных черт, отличий, свойств и параметров застройки. Подобные исследования можно назвать инвентаризацией территории, когда без пробелов и лакун изучается существующий массив пространственных данных по одному алгоритму. Для этого необходим научный механизм описания территорий, основанный на системном подходе и рассматривающий городское пространство в виде массива данных, пригодных для формализации и автоматизированной обработки.

Можно предположить, что город можно описать с точки зрения его дифференциации на различные территории по принципу изотропии — т.е. путем выделения однородных по структуре элементов [3, с. 29]. Исследования морфологии г. Новосибирска приводят к гипотезе **локально-целостного градостроительного образования (ЛЦГО)** — элемента городской структуры, в условных границах которого некоторые градостроительные свойства, характеристики и признаки среды распространены по территории более однородно и концентрированно, чем за его границами. Таким элементом может быть микрорайон, квартал городского центра, соцгородок, а также улица, площадь — т.е. городские структуры, которые представляют собой целостные пространственно-средовые единицы. Если применить это понятие к мировой и отечественной градостроительной практике, то характерными примерами ЛЦГО можно назвать районы «Дефанс» и Монмартр в Париже, «Черемушки» и «Сокол» в Москве, «Автово» в Санкт-Петербурге.

Предлагаемая к рассмотрению модель ЛЦГО представлена в универсальном виде, поэтому в его структуре перечислены все возможные компоненты, некоторые из которых могут отсутствовать в конкретных ЛЦГО. В целом выделяются три группы компонентов: элементы, связи и границы.

**Элементы ЛЦГО.** Само по себе явление целостности структуры настолько впечатляет, что утверждение, что целостность составляют некие компоненты, идентичные между собой по одному или нескольким признакам (архитектурному, планировочному, стилистическому, функциональному и пр.). Такие компоненты названы **элементами конструкции целостности**, так как они являются позитивными индикаторами целостности. Совокупность подобных элементов и составляет территорию целостного образования. Для микрорайона, например, такими элементами будут являться дворовые пространства, составленные жилыми группами, для соцгорода — элементы квартальной или строчной застройки. Соответственно, территории, составленные из неидентичных элементов или из элементов, идентичных по другим признакам, не являются частью данного ЛЦГО (рис. 1). Однако встречаются случаи, когда среди ряда идентичных элементов (элементов конструкции целостности), составляющих территорию ЛЦГО, в виде анклава находится элемент, не идентичный остальным. При этом гипотетически можно сказать, что на его месте мог бы быть идентичный элемент (возможно, он действительно был там ранее). В этих случаях неидентичные элементы не исключаются из состава

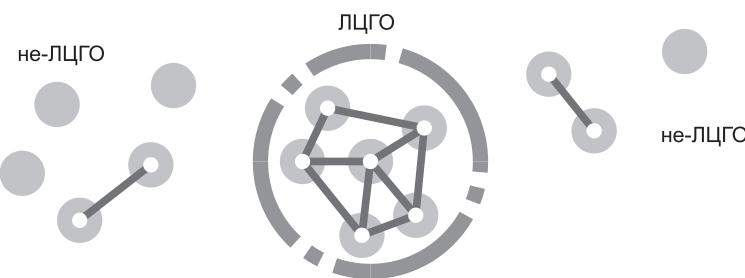


Рис. 1. Упрощенная модель локально-целостного градостроительного образования

ЛЦГО, но называются **элементами деконструкции целостности**, так как являются негативными индикаторами целостности и выявляются каждый раз индивидуально, на основе исторического, функционального и композиционного анализа ЛЦГО. На реальном материале — замещенные фрагменты среды (часто в ковровой барачной застройке, в «частном секторе»), есть и распространенное явление — заполнение когда-то не до конца реализованных градостроительных комплексов.

Важно отметить, что качества целостности не носят априори «положительный» характер. Целостная застройка может быть как высокоурбанизированной, так и депрессивной, поэтому элементы конструкции и деконструкции целостности — относительные понятия, описывающие лишь внутренние взаимоотношения между компонентами среды.

**Ядро** ЛЦГО — особый элемент системы, который составляет целостность по отношению к другим элементам не по критерию рядовой идентичности признака, а по критерию концентрированного выражения признака (как правило, композиционно-ансамблевого свойства), а также почти всегда по функциональному критерию. В границах ЛЦГО может выделяться несколько ядер (рис. 2).

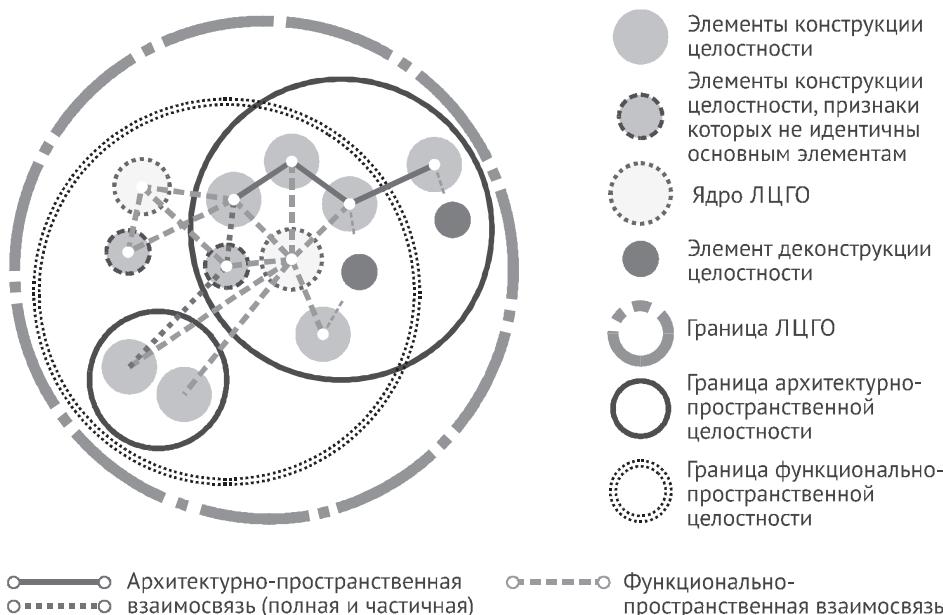


Рис. 2. Принципиальная модель локально-целостного градостроительного образования

**Связи между элементами ЛЦГО.** Как было сказано, элементы конструкции целостности объединяются в совокупность по ряду признаков. Такие признаки задаются связями между элементами ЛЦГО. Выявлено две основные категории связей: архитектурно-планировочная и функционально-планировочная. Свойство идентичных элементов собираться в целостности можно назвать **связанностью**.

**Архитектурно-планировочная связь** описывает объединение элементов в целостность по признакам, связанным с их морфологическими характеристиками. Среди этих признаков указываются два типа.

*Планировочный признак* целостности определяет последнюю через наличие композиционной логики планировки (в том числе через наличие логики равномерно неорганизованной планировки). Упорядоченная квартальная, строчная, ковровая структура застройки, или, напротив, нерегулярная (отчасти хаотическая) структура индивидуальной застройки и выражают планировочный признак целостности.

*Стилистический (средовой) признак* определяет целостность, которая проявляется в наличии какого-либо архитектурного стиля или, в общем, в равномерном наличии идентичных качеств архитектурной среды: фасадных решений, уровня благоустройства и иных качеств, которые А. Гутнов приписывал «плазме» города [4].

При этом условно можно выявить два уровня архитектурно-планировочной связи: *полную*, когда элементы целостности связаны совершенно идентичными признаками, и *частичную*, когда между элементами имеются незначительные различия каких-либо признаков при общем единстве. Так, при идентичности квартального принципа планировки соцгорода различные его элементы (кварталы) могут отличаться, например, стилистикой фасадов или материалом стен, что будет выражать частичную архитектурно-планировочную связь.

**Функционально-планировочная связь** описывает объединение элементов в целостность по ряду признаков, связанных с их неморфологической логикой взаимодействия.

*Социально-бытовой признак* объединяет элементы ЛЦГО по критерию их связанности функционально-бытовыми отношениями: пользованием объектами обслуживания, образования, культуры, производства.

«Управленческий» признак объединяет элементы ЛЦГО по критерию их ведения каким-либо управлением институтом.

*Социально-культурный признак* описывает элементы ЛЦГО по критерию принадлежности к социальным группам.

*Топонимический признак* объединяет территории, получившие устойчивые наименования.

Кроме того, на перечисленные признаки целостности накладывается *историко-генетический фактор*, который указывает на наличие и изменение тех или иных признаков целостности в исторической ретроспективе. Именно за счет этого фактора исследуется устойчивость пространственно-функциональных форм ЛЦГО. Наследование этих форм происходит как непосредственно (в виде физического сохранения этих форм), так и опосредованно (как закрепление в исторической памяти). То есть дом культуры, построенный в советские годы, может функционировать

и в настоящее время, преемственно развивая свою изначальную функцию, а может и сменить свое назначение, став торговым центром, но на долго останется в сознании населения в качестве ориентира как «ДК».

Выделение целостных территорий на основе функционально-планировочной связанности осуществляется для каждого ЛЦГО индивидуально, с различным сочетанием перечисленных признаков в зависимости от их значения (назначается «ведущий признак»). Две рассмотренные категории связей могут объединять элементы по отдельности или совместно, поэтому при описании свойств ЛЦГО указываются соответствующие факторы целостности: архитектурно-планировочный, функционально-планировочный и интегративный.

**Границы ЛЦГО.** Было установлено, что территории ЛЦГО определяются не только целостностью элементов, но и пространственной **связанностью**. Однако связанность может прерываться в некоторых границах (улицами, естественными препятствиями, разделяющими даже идентичные локальные ареалы на обособленные части). Тем самым **границы** служат идентификаторами **локализации** ЛЦГО.

Выявлено два основных типа границ, соответствующие двум типам пространственной связанности.

**Граница архитектурно-пространственной целостности** определяет совокупность элементов, объединенных архитектурно-пространственными связями. Аналогично **граница функционально-пространственной целостности** задается совокупностью функционально связанных элементов. В основном территории, ограниченные двумя типами границ, накладываются друг на друга. Границей ЛЦГО в целом является общий внешний контур двух упомянутых типов границ.

Конфигурация наложения границ друг на друга может служить индикатором степени локализации. Если архитектурно-планировочная и функционально-планировочная границы полностью совпадают, то можно говорить о полной локализации ЛЦГО. Микрорайон — типичный пример полной локализации, когда архитектурный и функциональный контуры почти соответствуют друг другу.

По мере развития ЛЦГО теряет степень своей локализации: границы начинают расползаться. Часто разбивается, фрагментируется архитектурно-пространственная целостность (рис. 3). Это естественные процессы метаморфоза городской ткани.

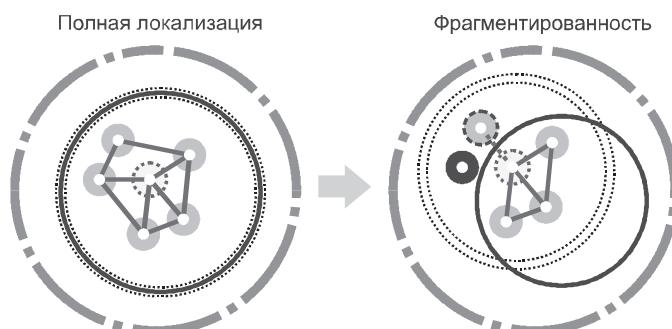


Рис. 3. Вариант трансформации структуры ЛЦГО в результате его эволюции

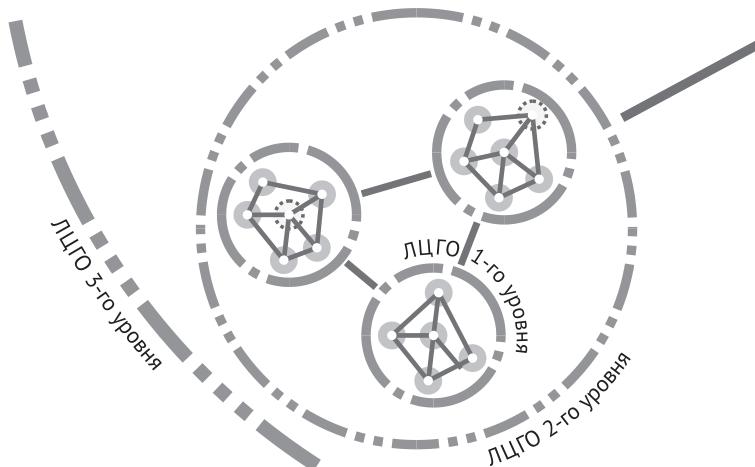


Рис. 4. Схема фрактальности ЛЦГО

**Фрактальность модели ЛЦГО.** В процессе моделирования и апробации модели было установлено, что ЛЦГО обладает свойствами фрактальности, т. е. может последовательно применяться к различным по масштабу территориям с иерархическим замещением структурных частей модели (рис. 4). На основе этого наблюдения составлена классификация масштабных уровней ЛЦГО (таблица), в которой идентификатором служит элемент конструкции целостности. Так, ЛЦГО одного масштабного уровня может являться элементом ЛЦГО другого уровня.

#### Классификация масштабных уровней ЛЦГО

Масштабный уровень ЛЦГО	Элемент конструкции целостности	Территория ЛЦГО, соответствующая его элементу
1	Здание, строение, сооружение	Квартал, жилая группа
2	Квартал, жилая группа, школьный комплекс	Микрорайон, комплекс соцгорода, промузел
3	Микрорайон, комплекс соцгорода, промузел	Район, жилмассив
4	Район, жилмассив	Муниципальный округ, город

**Заключение.** Результаты исследования позволили сформулировать новое модельное понятие — «локально-целостное градостроительное образование». Оно фиксирует устойчивые пространственные элементы городской среды, которым свойственны качества целостности и локализованности, что позволяет выделять границы таких элементов среди городской ткани. Рассматривая локально-целостные градостроительные образования сквозь призму системного подхода, удалось выявить их структуру и состав. Соотношение элементов и связей определяет такие свойства ЛЦГО, как степень локализации, степень целостности, а также фрактальность (структурное самоподобие).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Шубенков, М.В. Структура архитектурного пространства: автореф. дис. ... д-ра архитектуры [Текст] / М.В. Шубенков. — М., 2006. — 57 с.

2. Поповский, Д.И. Архитектурно-планировочная организация зон малоэтажной застройки Новосибирска (к проблеме реконструкции): автореф. дис. ... магистра архитектуры [Текст] / Д.И. Поповский. — Новосибирск, 2011. — 28 с.
3. Тарасова, Л.Г. Градостроительное планирование и регулирование развития крупных городов с учетом действия процессов самоорганизации: автореф. дис. ... д-ра архитектуры [Текст] / Л.Г. Тарасова; Саратов. гос. техн. ун-т. — Саратов, 2010.
4. Гутнов, А.Э. Будущее города [Текст] / А.Э. Гутнов, И.Г. Лежава. — М., 1977.

*ГАШЕНКО Антон Евгеньевич, асп.; E-mail: antongashenko@yandex.ru  
Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия*

Получено 08.07.14

**Gashenko Anton Evgenievich**, post-graduate student; E-mail: antongashenko@yandex.ru, Novosibirsk State Academy of Architecture and Arts, Russia

## **THEORETICAL MODEL OF AN URBAN PATTERN**

The author of the article describes a unit of city structure named an urban pattern. The new term allows to generalize such functionally and typologically separate concepts, as, for example, city block, an industrial hub, railway station, a sports complex, a dump, the residential district, a campus, a cemetery and other elements of city space with the settled borders. The author offers theoretical model of such system. He gives a classification of elements and relationships and also principles of their corellation. Fractal character of model confirms the thesis that the city space is organized systemically.

**Key words:** urban pattern, development, integrity, model.

## **REFERENCES**

1. Shubenkov, M.V. Structure of architectural space: Author's Abstract of Dissertation... Dr. Arch. [Text] / M.V. Shubenkov. — M., 2006. — 57 p.
  2. Popovsky, D.I. Architectural and planning organization of low density residential zones in Novosibirsk (for problem of reconstruction): Author's Abstract of Dissertation... Master of Arch. [Text] / D.I. Popovsky. — Novosibirsk, 2011. — 28 p.
  3. Tarasova, L.G. Urban planning and regulation of growth of large cities with processes of self-organisation: Author's Abstract of Dissertation... Dr. Arch. [Text] / L.G. Tarasova. — Saratov, 2010.
  4. Gutnov, A.E. Future of city [Text] / A.E. Gutnov, I.G. Lezhava. — M., 1977.
-

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 621.878.2:621.396

Ю.В. АВДЕЕВ, А.Д. КОНОНОВ, А.А. КОНОНОВ, Н.А. ВАРДАНЯН

### МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ ДИСТАНЦИОННОМ УПРАВЛЕНИИ МАШИНАМИ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

В работе исследуются применимость и возможности оптимизации навигационных координатометрических систем для определения текущего местоположения строительных и дорожных машин при автоматическом дистанционном управлении движением.

Ключевые слова: дистанционное управление, строительно-дорожные машины, навигационные системы, погрешности измерения координат.

Важным направлением повышения эффективности применения строительных и дорожных машин (СДМ), например, в строительстве автомобильных дорог, и безопасности жизнедеятельности операторов является развитие систем дистанционного радиоуправления [1]. Решение проблемы дистанционного управления СДМ включает в себя задачи [2], часть из которых может быть решена теоретически, например [3]. Для обеспечения автоматического управления движением технологических машин дорожно-строительного комплекса по требуемым траекториям необходимы разработка и исследование разностно- дальнометрических систем [4], способных с высокой точностью определять текущее положение машины.

В работах<sup>1,2</sup> рассматривалась одна из реализаций системы измерения координат движущейся машины, сущность которой сводится к тому, что излучение амплитудно-модулированных колебаний принимается на движущемся объекте трехканальным радиоприемником, а специализированное вычислительное устройство (СВУ) формирует на базе расчетной информации сигналы управления для электрогидравлических исполнительных механизмов (ИМ). Схема системы измерения координат изображена на рис. 1, где обозначено: 1 — приемники, 2 — основной передатчик, 3 — передатчик команд управления, 4 — фазоизмерительное устройство (ФИУ); 5 — специализированное вычислительное устройство.

<sup>1</sup> Маршаков В.К., Кононов А.А., Аникин В.Н. Система определения координат для автоматического управления мобильными объектами // Сб. докл. XVII Междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 2011, Т. 2. С. 1118–1125.

<sup>2</sup> Авдеев Ю.В., Кононов А.А., Варданян Н.А., Аникин В.Н. К вопросу точности отслеживания трассы при автоматическом управлении движением машинно-тракторных агрегатов // Сб. ст. к междунар. науч.-практ. конф. «Научно-технический прогресс в производстве». Минск, 2011. Т. 1. С. 114–118.

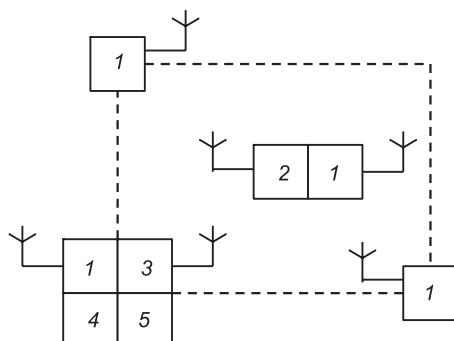


Рис. 1. Схема системы измерения координат с использованием специализированного вычислительного устройства

ется взаимное влияние сигналов передатчика и приемника, приводящее к возникновению комбинационных частот. Погрешности измерения при этом могут быть существенными, если учесть, что значения частот передатчиков лежат в достаточно узком частотном диапазоне. Кроме того, работа каналов приемного устройства на разных частотах усложняет их настройку и регулировку с целью получения идентичных фазовых характеристик.

От вышеуказанных недостатков в значительной мере свободна предлагаемая ниже схема измерения текущих координат дорожных и строительных машин, которая представлена на рис. 2, где 1 — приемники; 2 — радиопередатчик; 3 — передатчик команд управления; 4 — фазоизмерительное устройство; 5 — специализированное вычислительное устройство; 6 — формирователь модулирующих частот; 7 — приемник команд управления; 8 — электрогидравлические исполнительные механизмы.

Приведенная на рис. 2 схема измерения текущих координат работает следующим образом. С помощью блока 6 формируется напряжение суммы двух частот, которым модулируется сигнал несущей частоты, излучаемой радиопередатчиком 2. Амплитудно-модулированный сигнал принимается тремя идентичными радиоприемниками 1, настроенными на одну и ту же частоту и имеющими близкие фазочастотные характеристики. Выходы радиоприемников соединены со входами фазоизмерительных

Представленная схема обработки информации не лишена недостатков, связанных с возникновением погрешностей в измерении текущих координат и определенными трудностями технической реализации отдельных блоков системы. Возникновение погрешностей связано с работой как передающей, так и приемной части системы измерения текущих координат<sup>3</sup>.

Основным недостатком такой системы, приводящим к возникновению погрешностей измерения, является

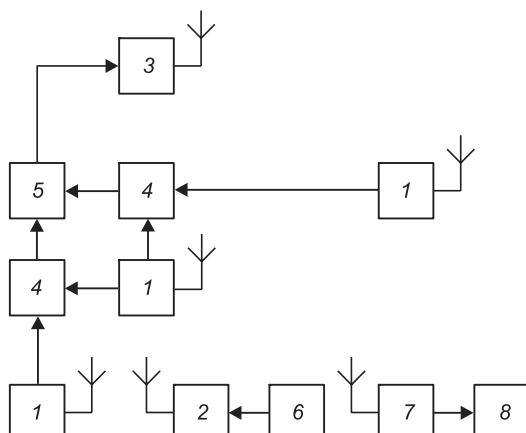


Рис. 2. Схема измерения текущих координат машины

<sup>3</sup> Маршаков В.К., Кононов А.Д., Кононов А.А., Варданян Н.А. Применение методов пространственной фильтрации для автоматического управления подвижными объектами // Сб. докл. XIII Междунар. науч.-техн. конф. «Кибернетика и высокие технологии XXI века». Воронеж, 2012. Т. 1. С. 174–181.

устройств 4, откуда сигналы поступают на специализированное вычислительное устройство 5. Сформированное СВУ напряжение модулирует несущую частоту передатчика команд управления 3. Принятые приемником команд управления 7 сигналы преобразуются в напряжения для управления электрогидравлическими ИМ 8.

Предложенная схема измерения текущих координат строительных и дорожных машин имеет по сравнению с ранее описанными ряд существенных преимуществ и позволяет практически исключить погрешности, возникающие вследствие взаимного влияния излучений передатчиков. Эти преимущества сводятся к следующему:

- функционирование системы осуществляется только на одной рабочей (несущей) частоте;
- используемая для передачи команд управления частота значительно отличается от рабочей частоты системы и не влияет на процесс измерения;
- приемная часть системы включает в себя три идентичных приемных тракта, настроенных на одну и ту же частоту, что значительно облегчает настройку и регулировку для получения близких фазочастотных характеристик;
- использование идентичных приемных устройств системы значительно облегчает процесс ее тиражирования, т.е. изготовления и наладки в условиях их поточного производства;
- переход в перспективе к режиму временного разделения дает возможность использовать предлагаемую систему в автоматизированных системах управления комплексом объектов.

Для управления на расстоянии исполнительными электрогидравлическими механизмами в предлагаемой схеме используется канал радиоуправления, который включает в себя передатчик мощностью 3 Вт и приемник.

Вариант дальнейшего усовершенствования схемы определения текущих координат предлагается на рис. 3, где 1, 2, 3 — избирательные усилители высокой частоты; 4, 28, 29 — кварцевые генераторы; 4', 28', 29' — умножители частоты; 5, 6, 7 — смесители; 8, 9, 10 — усилители промежуточной частоты; 11, 12, 13 — детекторы; 14, 15, 16 — усилители модулирующих частот; 17, 19, 21 — фильтры первой модулирующей частоты; 18, 20, 22 — фильтры второй модулирующей частоты; 23, 24, 25 — смесители; 26 — кварцевый гетеродин; 27 — фазоизмерительное устройство.

Сохраняя описанные выше достоинства схемы (см. рис. 2), последний вариант содержит существенные отличия, которые сводятся к следующему.

В о - п е р в ы х, высокочастотные амплитудно-модулированные колебания, излучаемые передатчиком, принимаются тремя приемниками и испытывают преобразование частоты с помощью гетеродинов с кварцевой стабилизацией частоты. Получение кварцеванных частот, необходимых для преобразования, осуществляется с помощью соответствующих кварцевых генераторов и умножителей частоты. Использование кварцевых

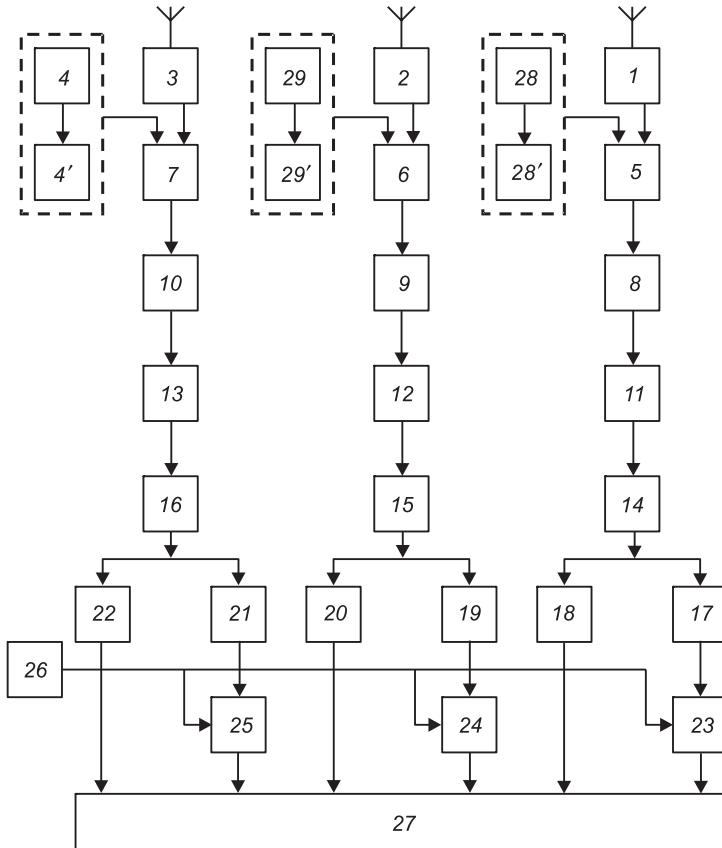


Рис. 3. Усовершенствованная схема устройства обработки выходных сигналов системы измерения координат

генераторов позволило значительно стабилизировать промежуточную частоту и уменьшить фазовые искажения в приемном тракте.

Во-вторых, особенность предлагаемой усовершенствованной схемы заключается в использовании лишь одного преобразования частоты модулирующего сигнала на точном отсчете. Частота грубого отсчета при этом не испытывает гетеродинного преобразования. Это позволяет на грубом отсчете получить более чистый сигнал для дальнейших измерений фазовых сдвигов приемных каналов.

Таким образом, работа приемного устройства и устройства обработки выходных сигналов сводится к следующему. Электромагнитные колебания, излучаемые передатчиком, принимаются антеннами трех каналов, после чего усиливаются, преобразуются, детектируются. Продетектированные сигналы поступают на фазоизмерительное устройство, при этом сигнал точного отсчета — с понижением частоты.

Измерение фазовых соотношений, содержащих информацию для определения координат, сводится к получению электрических сигналов на выходах приемных устройств путем понижения частоты гетеродинным способом для последующего измерения фазовых сдвигов фазоизмерительным устройством.

Предложенная фазоразностная гиперболическая система для дистанционного управления движением машин дорожно-строительного ком-

плекса и эффективное применение командных методов ориентации предполагают использование их в совокупности с системами отслеживания предыдущих траекторий для взаимного корректирования в ходе выполнения различных технологических процессов.

Полученные результаты могут быть полезны разработчикам систем дистанционного управления машинами в дорожном строительстве.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авдеев, Ю.В. Анализ принципов дистанционного адаптивного управления землеройно-транспортными машинами [Текст] / Ю.В. Авдеев, А.Д. Кононов, А.А. Кононов // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 9. — С. 41–46.
2. Кононов, А.Д. Алгоритм формирования сигналов управления в системах следящего дистанционного управления землеройно-транспортными машинами [Текст] / А.Д. Кононов, Ю.В. Авдеев, А.А. Кононов // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 1. — С. 81–86.
3. Авдеев, Ю.В. Устройство цифровой обработки выходных сигналов координатомерной системы для дистанционного управления землеройно-транспортными машинами [Текст] / Ю.В. Авдеев, А.Д. Кононов, А.А. Кононов, Н.А. Варданян // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 10. — С. 74–79.
4. Авдеев, Ю.В. Сравнительный анализ фазовых методов определения координат в задачах дистанционного автоматического управления машинами дорожно-строительного комплекса [Текст] / Ю.В. Авдеев, А.Д. Кононов, А.А. Кононов, Н.А. Варданян // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 1. — С. 86–93.

*АВДЕЕВ Юрий Валентинович, канд. техн. наук, доц.*

*Воронежский государственный архитектурно-строительный университет*

*КОНОНОВ Александр Давыдович, канд. физ.-мат. наук, доц.*

*Воронежский государственный архитектурно-строительный университет*

*КОНОНОВ Андрей Александрович, д-р техн. наук; E-mail: kniga16@mail.ru*

*Воронежский государственный архитектурно-строительный университет*

*ВАРДАНЯН Нара Арташесовна, асп.*

*Воронежский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 08.07.14

**Avdeev Yuriy Valentinovich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Kononov Aleksandr Davydovich**, candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Kononov Andrey Alexandrovich**, doctor of technical sciences; E-mail: kniga16@mail.ru, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Vardanyan Nara Artashesovna**, post-graduate student, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

## **METHOD OF COMPENSATION OF MEASURING ERRORS OF COORDINATES AT SELF-ACTING FULL REMOTE CONTROL BY MACHINES OF A ROAD-BUILDING COMPLEX**

In operation are investigated applicability and opportunities of optimization of navigators of measuring of coordinates for definition of flowing location of building and road machines at self-acting full remote control by driving.

**Key words:** full remote control, building road machines, navigation systems, measuring error of coordinatesng.

REFERENCES

1. Avdeev, Yu.V. The analysis of principles of a remote adaptive technique by motorgraders, scrapers and bulldozers [Text] / Yu.V. Avdeev, A.D. Kononov, A.A. Kononov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 9. — P. 41–46.
  2. Kononov, A.D. Algorithm of shaping of a management signals in systems of tracking full remote control by motorgraders, scrapers and bulldozers [Text] / A.D. Kononov, Yu.V. Avdeev, A.A. Kononov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 1. — P. 81–86.
  3. Avdeev, Yu.V. The device of numeral handling of output signals of defining of coordinate of system for full remote control of motorgraders, scrapers and bulldozers [Text] / Yu.V. Avdeev, A.D. Kononov, A.A. Kononov, N.A. Vardanyan // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 10. — P. 74–79.
  4. Avdeev, Yu.V. The comparative analysis of phase methods of a coordinates setting in problems of remote automatic control of machines of a road-building complex [Text] / Yu.V. Avdeev, A.D. Kononov, A.A. Kononov, N.A. Vardanyan // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2014. — N 1. — P. 86–93.
-

УДК 624.04

М.Н. ДАНИЛОВ, Н.Н. ФЕДОРОВА

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА МНОГОСЛОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ\*

Статья посвящена исследованию поведения многослойных ограждающих конструкций под действием статической нагрузки. Описана методика расчета многослойных конструкций с учетом нелинейных свойств материалов. На основе программного комплекса ANSYS создана расчетная модель конструкции, учитывающая геометрическую и физическую нелинейности. Представлены результаты численного исследования напряженно-деформированного состояния панелей различной длины. Установлен характер распределения напряжений и деформаций в элементах конструкции. Определены пределы нагрузок, при которых конструкция работает линейно, а также нагрузки, за пределами которых возникают необратимые деформации. Обоснована необходимость выполнения расчетов с учетом влияния нелинейных свойств.

**Ключевые слова:** сэндвич-панель, многослойные конструкции, метод конечных элементов, ANSYS, геометрическая нелинейность, пластичность.

**1. Введение.** Многослойные стеновые и кровельные панели широко применяются в строительстве. Однако расчетные методики и системы экспериментального обеспечения проектирования разработаны для однослоиных конструкций и их применение в многослойных конструкциях затруднительно. Для использования таких методик требуется осреднение свойств материалов многослойной конструкции, наличие экспериментальных данных о предельных нагрузках для многослойных конструкций при простых видах нагружения и употребление интегральных критериев прочности. В качестве подобного критерия часто рассматривают предельное значение величины прогиба конструкции под действием нагрузки. Кроме того, с помощью таких методик невозможно рассчитать геометрические размеры всех конструктивных элементов многослойной конструкции. Это приводит к необходимости развития методик проектирования многослойных конструкций, основанных на анализе прочности всех элементов, работающих в их составе, причем в таких методиках для каждого элемента должны учитываться физико-механические свойства материала, из которого он выполнен, и назначаться соответствующий локальный критерий прочности.

Применение расчетной методики ограничивается тем, что проектирование проводится на основании анализа прочности отдельных элементов, а экспериментальная проверка работоспособности конструкции осуществляется на основе интегрального критерия прочности для многослойной конструкции в целом. Использование интегрального критерия разруше-

\* Работа осуществлена при поддержке Министерства образования и науки РФ, проект № 211, задание № 2014/140 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания.

ния для многослойной конструкции связано с тем, что при проведении натурного эксперимента трудно отследить момент перехода отдельного элемента конструкции в предельное состояние. Поэтому необходима разработка методики проектирования, позволяющей установить интегральный предел прочности многослойной конструкции по результатам прочностного анализа всех ее элементов. Основой для этой методики может послужить численное моделирование с помощью программных комплексов для ЭВМ.

В предыдущей работе [1] описана технология численного исследования напряженно-деформированного состояния строительных сэндвич-панелей при небольших нагрузках и представлены результаты расчетов этих конструкций без учета физической нелинейности свойств материалов. Однако в процессе эксплуатации возникают нагрузки, при которых могут проявляться нелинейные свойства материалов.

Моделирование многослойных конструкций с учетом геометрической и физической нелинейностей может быть выполнено с помощью программного комплекса ANSYS [2], имеющего свидетельство верификации Российской академии архитектуры и строительных наук<sup>1</sup>. Матрица тестовых задач [3], использовавшихся для верификации, включала расчеты с учетом больших перемещений [4, 5], пластичности [6, 7], ортотропии свойств материалов [8] и расчеты слоистых конструкций [9].

Целями настоящей работы являются:

- 1) развитие методологии решения практических проектных задач, основанной на уточненных методах математического моделирования;
- 2) исследование поведения строительных сэндвич-панелей за пределами упругой стадии [1] работы конструкций.

**2. Постановка задачи.** Объект исследования — трехслойные сэндвич-панели (рис. 1), состоящие из стальных профилированных листов

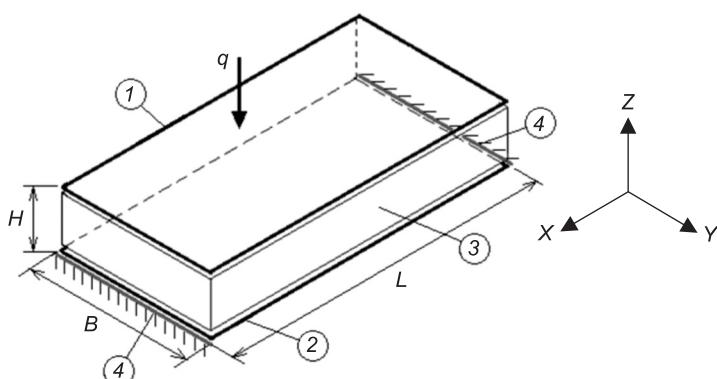


Рис. 1. Геометрическая модель и схема нагружения панели

1 — наружная металлическая обшивка; 2 — внутренняя металлическая обшивка; 3 — утеплитель; 4 — места закрепления

<sup>1</sup> Свидетельство № 02 / ANSYS / 2009 о верификации программного средства, применяемого для решения задач теплопроводности и фильтрации, определения статического, температурного и динамического напряженно-деформированного состояния пространственных конструкций, зданий и сооружений с учетом эффектов физической, геометрической, структурной и генетической нелинейностей на основе метода конечных элементов. Выдано Российской академией архитектуры и строительных наук.

(1, 2) и теплоизоляционного слоя (3), который выполнен из пенополистирола. Металлические листы соединены со средним слоем с помощью синтетического клея на полиуретановой основе.

В работе исследованы панели шириной  $B = 1$  м, длиной  $L = 1, 2$  и  $3$  м. Толщина слоя утеплителя  $H = 50$  мм, толщина металлических листов  $\delta = 0,7$  мм. Панель защемлена с двух сторон по кромкам нижней металлической обшивки. К верхней обшивке панели приложена равномерно распределенная нагрузка  $q$ , максимальная величина которой составляет  $50$  кПа.

**3. Математическая модель.** Математическое моделирование механической реакции многослойных конструкций на статические нагрузки основано на методе конечных элементов [10]. При создании математической модели приняты следующие основные допущения: 1) динамические эффекты отсутствуют (статическая постановка); 2) все элементы конструкции соединены неразрывно; 3) при любых деформациях сохраняется структурная целостность элементов конструкции; 4) поведение всех материалов предполагается упругопластическим. Математическая модель, описывающая линейную стадию работы рассматриваемых конструкций, представлена в [1].

При описании работы многослойных конструкций за пределами упругой стадии нужно учитывать физическую и геометрическую нелинейность. Необходимость учета геометрической нелинейности для исследуемой конструкции обусловлена ее геометрией (малая толщина в совокупности с большой длиной) и схемой нагружения. Моделирование больших перемещений и поворотов осуществляется в соответствии с геометрически нелинейной теорией деформаций [11–13], рассматривающей нагружение конструкций, сопровождаемое конечными перемещениями и поворотами материальных элементов.

Для описания упругопластического поведения используется теория течения изотропно упрочняющегося упругопластического материала, согласно которой в пространстве главных напряжений существуют поверхность упругости  $f$ , внутри которой материал подчиняется закону Гука, и поверхность пластичности (предела текучести)  $F$ , за пределами которой материал ведет себя пластиично. Пластическое течение при активном нагружении развивается по нормали к поверхности текучести.

Математическая модель упругопластического поведения основана на разложении приращения полной девiatorной деформации  $d\varepsilon_{ij}$  на сумму упругой  $d\varepsilon_{ij}^{el}$  и пластической  $d\varepsilon_{ij}^{pl}$  компонент:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^{el} + d\varepsilon_{ij}^{pl}.$$

Закон течения, определяющий направление пластических деформаций, задан соотношением [14]:

$$d\varepsilon_{ij}^{pl} = d\lambda \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}},$$

где  $\lambda$  — неотрицательная скалярная функция от напряженного состояния;  $Q$  — пластический потенциал;  $\sigma_{ij}$  — тензор напряжений. В работе использован ассоциированный закон пластического течения, при кото-

ром в качестве потенциала  $Q$  взята поверхность текучести  $F$ , и применен критерий пластичности Мизеса, согласно которому поверхность текучести имеет вид:

$$F(\sigma_e, \sigma_y) = \sigma_e - \sigma_y = 0,$$

где  $\sigma_e$  — эквивалентные напряжения по Мизесу;

$\sigma_y$  — предел текучести.

Физико-механические характеристики материалов исследуемой конструкции в упругой стадии работы [15] приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-механические характеристики материалов

Характеристика	Конструкционная сталь	Пенополиэтилен
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7850	35
Модуль Юнга $E$ , МПа	$2,11 \cdot 10^5$	5,00
Коэффициент Пуассона $\nu$	0,3	0,3

Упругопластическое поведение стали описывалось билинейной зависимостью (рис. 2, а), определяемой тремя параметрами: модулем Юнга  $E$ , отвечающим за угол наклона упругого участка, пределом текучести  $\sigma_y = 250$  МПа и тангенциальным модулем  $E_t = 145$  МПа, характеризующим угол наклона участка пластического течения.

Для моделирования пенополиэтилена использовалась полилинейная модель изотропного упрочнения, аппроксимирующая нелинейную диаграмму работы материала (рис. 2, б). Предел пропорциональности для пенополиэтилена совпадает с пределом текучести и равен  $\sigma_{\text{пп}} = 0,23$  МПа.

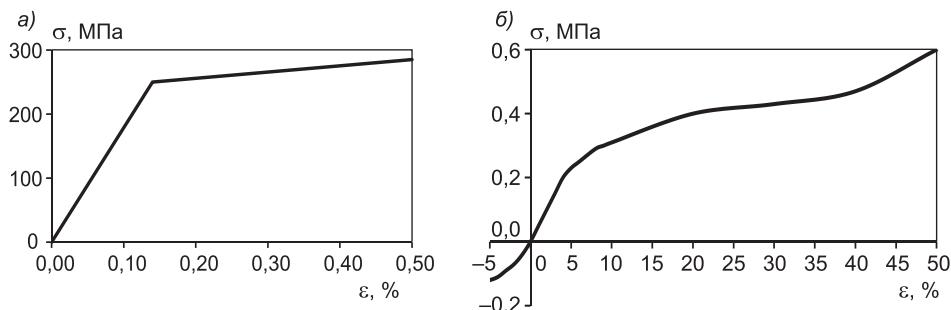


Рис. 2. Диаграммы деформирования стали (а) и пенополиэтилена (б)

**4. Методика проведения расчетов.** Сэндвич-панель исследована с помощью конечно-элементного программного комплекса ANSYS 15.0<sup>2</sup>. Расчетная модель получена в среде Workbench.

Геометрические модели конструкций создавались в приложении ANSYS DesignModeler. Для построения расчетной сетки использовалось приложение ANSYS Meshing. Характерный размер элементов слоя утеплителя и обшивок составлял 0,01 м. Дискретизация среднего слоя выполнена 20-узловыми изопараметрическими элементами с квадратичными функциями формы (объемные элементы высокого порядка точности SOLID186). Необходимость использования элементов высокого по-

<sup>2</sup> ANSYS ACADEMIC Research, Custom number 531493.

рядка в области слоя утеплителя обусловлена характером напряженно-деформированного состояния, возникающего при действии нагрузки. Средний слой подвержен сжатию и изгибу. При этом в нем появляются значительные сдвиговые деформации. В этом случае элементы низкого порядка не обеспечивают требуемую точность расчетов. Стальные элементы панели моделировались оболочками заданной толщины. Обшивки панели в силу их малой толщины воспринимают преимущественно мембранные усилия, поэтому для обеспечения требуемой точности достаточно элементов низкого порядка. Дискретизация обшивок выполнена 4-узловыми изопараметрическими элементами с линейными функциями формы (оболочечные элементы низкого порядка точности SHELL181). Общее число элементов в зависимости от геометрических размеров модели составляло  $1 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^6$ .

Склейка стальных обшивок со средним слоем моделировалась как жесткий контакт с условием непрерывности перемещений в области контактного взаимодействия. Для описания такого вида контактного взаимодействия эффективно использование уравнений кинематических связей на основе элемента MPC184. При этом отрыв обшивок от утеплителя невозможен. Панель закреплена путем задания в качестве граничных условий на торцевых кромках нижней обшивки нулевых перемещений по всем направлениям.

Расчеты выполнялись с помощью метода конечных элементов в вариационной постановке [10]. Вычисление матрицы жесткости  $i$ -го конечного элемента  $[K]_i$  осуществлялось путем интегрирования по области конечного элемента

$$[K]_i = \int_{\Omega_i} [B]_i^T [D]_i [B]_i d\Omega_i$$

с использованием схем высокого порядка точности.

Здесь  $\Omega_i$  — область конечного элемента;

$[B]_i$  — матрица деформаций;

$[D]_i$  — матрица упругих свойств материала элемента.

Глобальная матрица жесткости  $[K]$  системы получается ассемблированием матриц жесткости всех элементов модели.

Нелинейная задача

$$[K(u)]\{u\} = \{F\}$$

решалась способом пошагового приращения нагрузки с применением на каждом шаге метода упругих решений для итерационного уточнения. Для получения решения на каждом шаге нагружения использовался метод Ньютона–Рафсона [10] с обновлением матрицы жесткости на каждой итерации (полная процедура метода). Для улучшения сходимости итерационного процесса применялся алгоритм адаптивного спуска [16], использующий касательную матрицу жесткости при нормальной сходимости и комбинацию секущей и касательной матриц жесткости в случае расходящегося процесса. Для ускорения процесса сходимости применялся алгоритм предиктора и алгоритм линейного поиска [17].

Решение систем линейных алгебраических уравнений выполнялось с точностью  $\varepsilon = 10^{-8}$  с помощью прямого и итерационного решателей.

**5. Задача о напряженно-деформированном состоянии многослойной конструкции.** В работе проведено численное моделирова-

ние панелей длиной 1, 2 и 3 м. Для каждой конфигурации сделано три расчета: 1) по линейно-упругой модели материалов без учета геометрической нелинейности (далее — модель 1); 2) упругой модели материалов с учетом геометрической нелинейности (модель 2); 3) упругопластической модели материалов с учетом геометрической нелинейности (модель 3). Расчеты с нелинейными моделями материалов без учета геометрической нелинейности проведены не для всех геометрических конфигураций из-за возникновения нефизических эффектов (больших перемещений).

Результаты расчетов приведены в табл. 2 и на рис. 3–6. В табл. 2 представлены результаты по величине прогиба панели в центральной точке нижней обшивки под действием максимальной нагрузки  $q = 50$  кПа. Таблица показывает, что величина прогиба панели в центральной точке нижней обшивки при расчетах по различным моделям отличается в несколько раз.

Таблица 2. Сравнение математических моделей

Конфигурация	Прогиб панели в центральной точке нижней обшивки, м		
	модель 1	модель 2	модель 3
$L = 1$ м	$7,44438 \cdot 10^{-2}$	$2,32738 \cdot 10^{-2}$	$2,91350 \cdot 10^{-2}$
$L = 2$ м	$3,09376 \cdot 10^{-1}$	$6,34659 \cdot 10^{-2}$	$1,31855 \cdot 10^{-1}$
$L = 3$ м	$7,84783 \cdot 10^{-1}$	$1,10724 \cdot 10^{-1}$	$2,42384 \cdot 10^{-1}$

На рис. 3 показана величина прогиба панели в центральной точке нижней обшивки в зависимости от величины нагрузки. Поведение конструкции под нагрузкой включает три стадии. Линейная стадия работы кон-

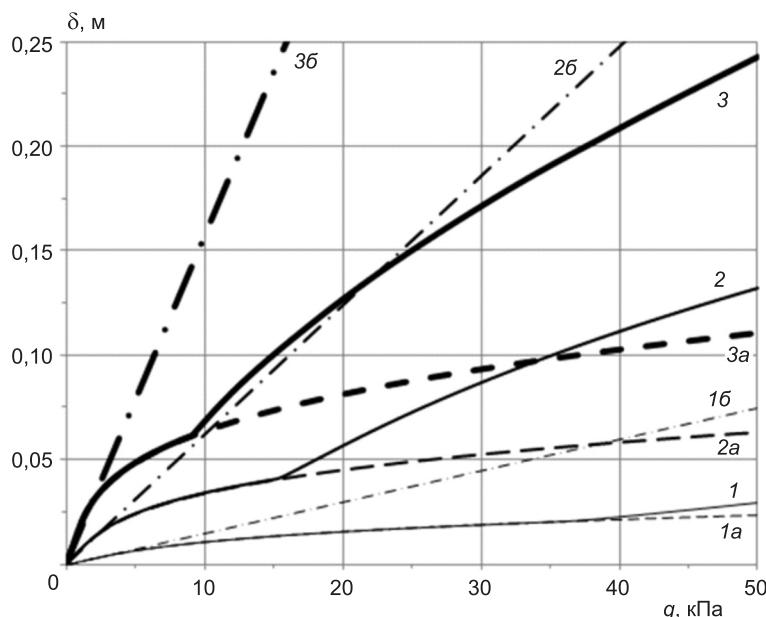


Рис. 3. Зависимость величины прогиба панели в центральной точке нижней обшивки от нагрузки:

1–3 — упругопластической модели материалов с учетом геометрической нелинейности (1a, 2a, 3a — модель материала с учетом геометрической нелинейности; 1б, 2б, 3б — линейно-упругая модель материала без учета геометрической нелинейности)

струкции происходит в некотором ограниченном диапазоне нагрузок  $q < q_{\text{лин}}$ , при которых соблюдается линейная зависимость между деформациями и нагрузкой. На второй стадии при  $q > q_{\text{лин}}$  значительно увеличивается жесткость конструкции за счет геометрической нелинейности. При достижении некоторой величины нагрузки  $q_{\text{пред}}$  жесткость конструкции резко снижается, что объясняется переходом в пластическую стадию работы.

На основе анализа данных, представленных на рис. 3, можно определить величины нагрузок, в пределах которых конструкция работает линейно. Для панели длиной 1 м величина нагрузки, соответствующая переходу в нелинейную стадию ( $q_{\text{лин}}$ ), составляет 5 кПа, для панели длиной 2 м — 3 кПа, для панели длиной 3 м — 1,8 кПа.

Величина предельной нагрузки, соответствующей переходу в пластическую стадию ( $q_{\text{пред}}$ ), как видно из графика (см. рис. 3), для панели длиной 1 м составляет 38 кПа, для панели длиной 2 м — 16 кПа, для панели длиной 3 м — 9 кПа. Эти величины можно принять в качестве нагрузок, соответствующих моменту наступления условного разрушения конструкции. Таким образом, при нагрузках  $q < q_{\text{пред}}$  можно говорить о нормальном эксплуатационном режиме работы конструкции.

Зависимость  $q_{\text{лин}}$  и  $q_{\text{пред}}$  от длины панели приведена на рис. 4.

В процессе нагружения панели переход каждого элемента конструкции в неупругую стадию происходит при определенной величине нагрузки. Исходя из этого, можно говорить об очередности наступления предельных состояний в элементах конструкции. Первым переходит в неупругую стадию средний слой, затем нижняя обшивка. Верхняя обшивка на всем интервале рассмотренных нагрузок работает в упругой стадии.

Распределение напряжений в элементах панели имеет неравномерный характер. На рис. 5 приведены графики распределения нормальных напряжений в элементах панели  $L = 2$  м при нагрузке  $q = 50$  кПа для участков 1 и 2 (расчет по модели 3).

Нижняя обшивка является наиболее нагруженной и находится в растянутом состоянии. На участке 1 (рис. 5, б, в) центральная часть обшивки нагружена равномерно с небольшим повышением до  $\sigma_x = 277$  МПа в точке  $x = 0,75$  м. Максимальное значение  $\sigma_y = 22,1$  МПа на участке 2 достигается в центральной точке нижней обшивки ( $y = 0$  м). К краям обшивки напряжения снижаются до значений  $\sigma_x = 240$  МПа,  $\sigma_y = 0,1$  МПа.

Слой утеплителя имеет сложное напряженно-деформированное состояние. Как видно из рис. 5, г, центральная и нижняя части слоя утеплителя на участке 1 при  $x = 0-0,85$  м растянуты в направлении

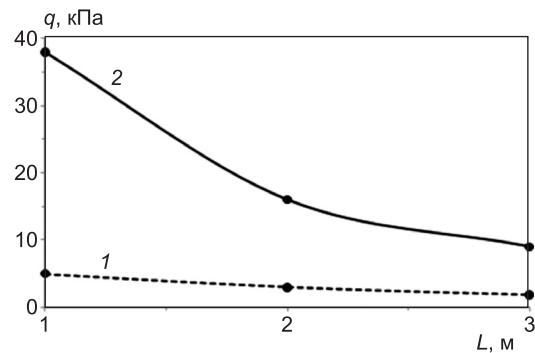


Рис. 4. Зависимость предельных нагрузок перехода в нелинейную стадию (1) и пластическую стадию (2) от длины панели

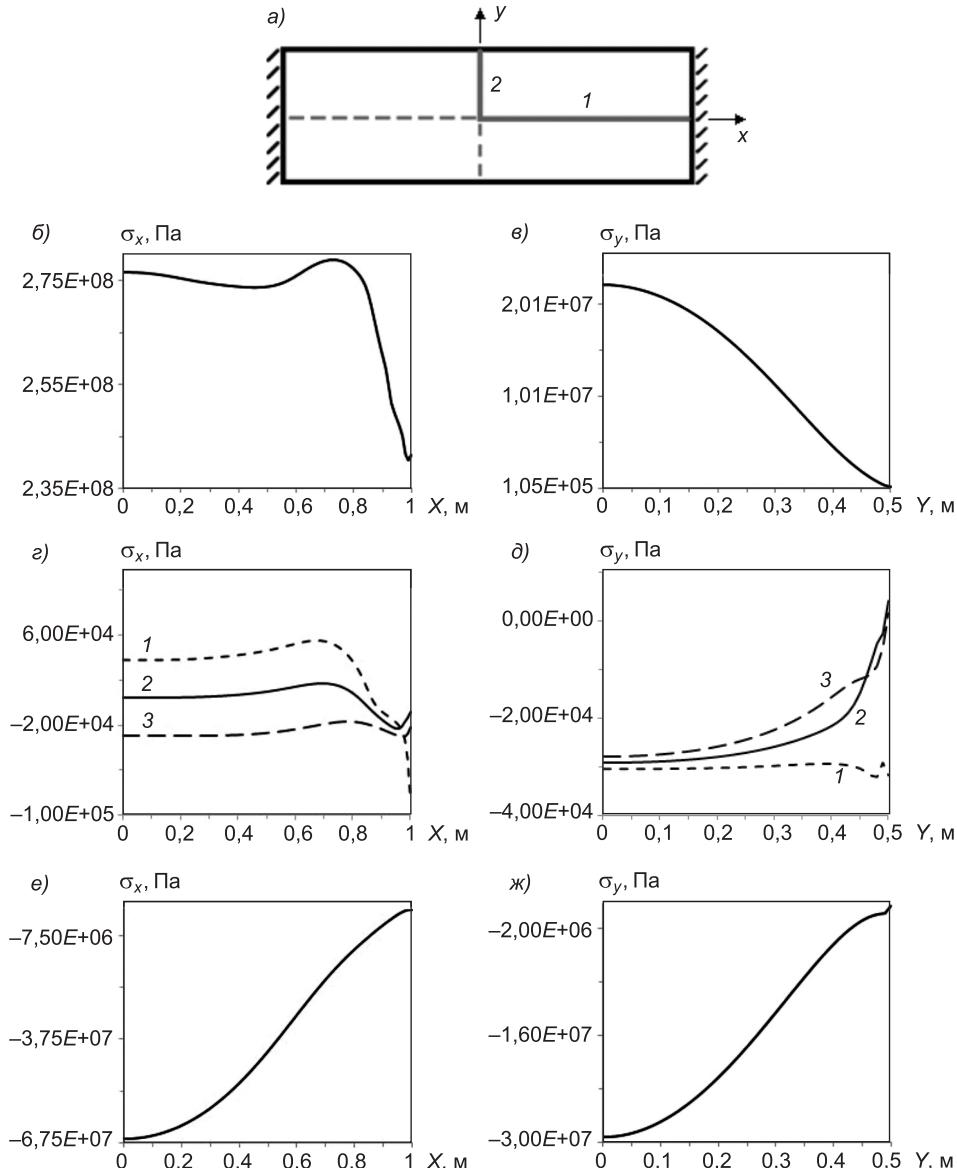


Рис. 5. Распределение напряжений для панели длиной 2 м:

*а* — схема расположения участков замера напряжений; *б* — участок 1 нижней обшивки; *в* — участок 2 нижней обшивки; *г* — участок 1 слоя утеплителя (1 — нижний слой, 2 — средний слой, 3 — верхний слой); *д* — участок 2 слоя утеплителя (1 — нижний слой, 2 — средний слой, 3 — верхний слой); *е* — участок 1 верхней обшивки; *ж* — участок 2 верхней обшивки

оси  $x$ . При  $x = 0,85\text{--}1,0$  м происходит переход в сжатое состояние, который вызван объемными деформациями утеплителя в результате сжатия под действием приложенной к верхней обшивке нагрузки. Верхняя часть слоя утеплителя на участке 1 ската в направлении оси  $x$ . Максимальное растягивающее напряжение  $\sigma_x = 55,2$  кПа достигается в нижней части слоя утеплителя в точке  $x = 0,7$  м. Максимальное сжимающее напряжение  $\sigma_x = -87$  кПа — в нижней части слоя утеплителя в точке  $x = 1$  м.

В направлении оси  $y$  (участок 2) слой утеплителя преимущественно сжат (рис. 5,  $\delta$ ), что вызвано деформациями растяжения в направлении оси  $x$ . Максимальное сжимающее напряжение  $\sigma_y = -30,5$  кПа наблюдается в нижней части слоя в точке  $y = 0$  м (по центру нижней обшивки). К краям панели напряжения снижаются. Кроме деформаций растяжения и сжатия в слое утеплителя возникают значительные сдвиговые и объемные деформации, обусловленные его геометрическими размерами и схемой нагружения.

Верхняя обшивка, в зависимости от длины панели, может быть как в сжатом, так и в растянутом состоянии. Например, при длине панели 1 м верхняя обшивка находится в сжатом состоянии, а при длине 2–3 м обшивка сжата только в центральной части и растянута вблизи мест закрепления. Максимальные напряжения достигаются в центре обшивки  $\sigma_x = -66,4$  МПа,  $\sigma_y = -29,3$  МПа. К краям обшивки напряжения снижаются. В реальных конструкциях такое напряженно-деформированное состояние верхней обшивки может привести к разрушению конструкции в результате отслоения верхней обшивки от слоя утеплителя вблизи мест закрепления. В центральной части происходит потеря устойчивости, в результате чего возникает эффект сморщивания обшивки.

Наибольшие пластические деформации в исследуемом диапазоне нагрузок наблюдаются в нижней обшивке и в слое утеплителя. В верхней обшивке панелей длиной 1, 2 и 3 м при нагрузках до 50 кПа пластические деформации отсутствуют. Картина распределения пластических деформаций по области нижней обшивки для панели длиной 1 м при нагрузке  $q = 50$  кПа представлена на рис. 6.

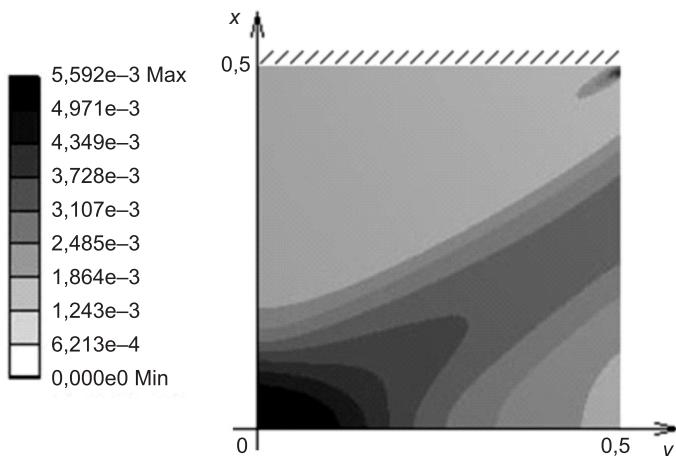


Рис. 6. Поле пластических деформаций для нижней обшивки панели  $L = 1$  м

Максимальные пластические деформации нижней обшивки возникают в ее центральной части, на незакрепленных кромках листа, а также вблизи угловых точек мест закрепления. В среднем слое неупругие деформации наблюдаются преимущественно вблизи мест закрепления.

**6. Выводы.** 1. Разработана вычислительная технология, позволяющая производить численное моделирование механической реакции строительных сэндвич-панелей на действие статических нагрузок.

2. Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) панелей длиной 1, 2 и 3 м при нагрузках  $q = 0\text{--}50$  кПа. Описаны особенности НДС всех элементов конструкции. Получены поля напряжений и деформаций. Определены предельные нагрузки, соответствующие переходу в нелинейную и пластическую стадии.

3. Проведено сравнение результатов расчетов, полученных с использованием линейно-упругих моделей материалов и с учетом геометрической и физической нелинейностей.

4. Дано обоснование необходимости учета нелинейных свойств материалов при моделировании воздействия на панель экстремальных нагрузок.

5. Разработанная модель может быть использована для моделирования поведения стеновых панелей при действии экстремальных нагрузок и распространена на кровельные панели, имеющие ребра жесткости на наружной обшивке.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данилов, М.Н. Конечно-элементное моделирование многослойных ограждающих конструкций [Текст] / М.Н. Данилов, Н.Н. Федорова // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 10. — С. 92–100.
2. ANSYS Inc.: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ansys.com>. (Дата обращения: 16.09.2014).
3. Белостоцкий, А.М. Верификационный отчет по программному комплексу ANSYS Mechanical [Текст] / А.М. Белостоцкий, С.И. Дубинский. — М. : Науч.-исслед. центр СтАДиО, 2009. — Инв. № 2009-РААСН-01/1.
4. Bathe, K.J. A formulation of general shell elements — the use of mixed interpolation of tensorial components [Текст] / K.J. Bathe, E.N. Dvorkin // Int. J. for Numerical Methods in Engineering. — 1986. — Vol. 22, N 3. — P. 720.
5. Tussman, T.A Finite element formulation for nonlinear incompressible elastic and inelastic analysis [Текст] / T. Tussman, K.J. Bathe // Computers and Structures. — 1987. — Vol. 26, N 1/2. — P. 357–409.
6. Timoshenko, S. Strength of materials. Advanced theory and problems. — P. 2, 3rd ed. [Текст] / S. Timoshenko; D. Van Nostrand Co., Inc., New York. — N.Y., 1900. — Article 64. — P. 349.
7. Timoshenko, S. Strength of material. Elementary theory and problems. — P. 2, 3rd ed. [Текст] / S. Timoshenko; D. Van Nostrand Co., Inc., New York. — N.Y., 1956. — Article 70. — P. 388.
8. Crandall, S.H. An introduction to the mechanics of solids [Текст] / S.H. Crandall, N.C. Dahl; McGraw-Hill Book Co., Inc., New York. — N.Y., 1959. — P. 225.
9. Roark, R.J. Formulas for stress and strain [Текст] / R.J. Roark, W.C. Young; McGraw-Hill Book Co., Inc., New York. — N.Y., 1975. — Article 7.2. — P. 112—114.
10. Клованич, С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики [Текст] / С.Ф. Клованич. — Запорожье : Изд-во журн. «Світ геотехніки», 2009. — 400 с.
11. Грин, А. Большие упругие деформации и нелинейная механика сплошной среды [Текст] / А. Грин, Дж. Адкинс. — М. : Мир, 1965. — 456 с.
12. Rankin, C.C. An element independent corotational procedure for the treatment of large rotations [Текст] / C.C. Rankin, F.A. Brogan // J. of Pressure Vessel Technology. — 1986. — Vol. 108, May. — P. 165–174.
13. Nour-Omid, B. Finite rotation analysis and consistent linearization using projectors [Текст] / B. Nour-Omid, C.C. Rankin // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. — 1991. — Vol. 93. — P. 353–384.

14. Самуль, В.И. Основы теории упругости и пластичности [Текст] / В.И. Самуль. — М., 1982.
15. Конструкционные материалы: Справ. [Текст] / Б.Н. Арзамасов, В.А. Брострем, Н.А. Буше и др.; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. — М. : Машиностроение, 1990.
16. Eggert, G.M. An adaptive descent method for nonlinear viscoplasticity [Текст] / G.M. Eggert, P.R. Dawson, K.K. Mathur // Int. J. for Numerical Methods in Engineering. — 1991. — Vol. 31. — P. 1031–1054.
17. Schweizerhof, K.H. Consistent linearization for path following methods in nonlinear FE analysis [Текст] / K.H. Schweizerhof, P. Wriggers // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. — 1986. — Vol. 59. — P. 261–279.

*ДАНИЛОВ Максим Николаевич, мл. науч. сотр.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*ФЕДОРОВА Наталья Николаевна, д-р физ.-мат. наук, проф.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено после доработки 16.07.14

**Danilov Maxim Nikolayevich**, junior scientist, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Fedorova Natalya Nikolayevna**, doctor of physical and mathematical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **FINITE ELEMENT MODELLING OF NONLINEAR BEHAVIOR OF THE MULTILAYER CONSTRUCTIONS**

The paper is devoted to investigation of the behavior of multilayer structures under static loads. The methodology of calculation of multilayer structures based on the nonlinear properties of materials is described. The calculation model that takes into account the geometrical and physical nonlinearity was created in the ANSYS software. The results of numerical investigations of the stress-strain state of the panels of different lengths are presented. The character of the stresses and strains distribution in structural elements is described. The loads at which the construction works linearly, as well as the ultimate loads at which the deformation becomes irreversible are defined. It is shown that the non-linear properties of materials should be taken into account during sandwich panel analysis.

**Key words:** sandwich panel, multilayer structures, finite element method, ANSYS, geometric nonlinearity, plasticity.

## **REFERENCES**

1. Danilov, M.N. Finite element modeling of the multilayer constructions [Text] / M.N. Danilov, N.N. Fedorova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 10. — P. 92–100.
2. <http://www.ansys.com>. (date of access: 16.09.2014).
3. Belostotsky, A.M. Verification report on the ANSYS mechanical software [Text] / A.M. Belostotsky, S.I. Dubinsky. — M. : StaDiO Research Center, 2009. — N 2009-PAACH-01/1.
4. Bathe, K.J. A formulation of general shell elements — the use of mixed interpolation of tensorial components [Text] / K.J. Bathe, E.N. Dvorkin // Int. J. for Numerical Methods in Engineering. — 1986. — Vol. 22, N 3. — P. 720.
5. Tussman, T. A finite element formulation for nonlinear incompressible elastic and inelastic analysis [Text] / T. Tussman, K.J. Bathe // Computers and Structures. — 1987. — Vol. 26, N 1/2. — P. 357–409.

6. Timoshenko, S. Strength of materials. Advanced theory and problems. — P. 2, 3rd ed. [Text] / S. Timoshenko; D. Van Nostrand Co., Inc., New York. — N.Y., 1900. — Article 64. — P. 349.
  7. Timoshenko, S. Strength of material. Elementary theory and problems . — P. 2, 3rd ed. [Text] / S. Timoshenko; D. Van Nostrand Co., Inc., New York. — N.Y., 1956. — Article 70. — P. 388.
  8. Crandall, S.H. An introduction to the mechanics of solids [Text] / S.H. Crandall, N.C. Dahl; McGraw-Hill Book Co., Inc., New York. — N.Y., 1959. — P. 225.
  9. Roark, R.J. Formulas for stress and strain [Text] / R.J. Roark, W.C. Young; McGraw-Hill Book Co., Inc., New York. — N.Y., 1975. — Article 7.2. — P. 112-114.
  10. Klovanich, S.F. Finite element method in nonlinear calculations [Text] / S.F. Klovanich. — Zaporozhe: Publisher of the journal «Svit geotekhniki», 2009. — 400 p.
  11. Grin, A. Large elastic deformations and nonlinear mechanics of continuous media [Text] / A. Grin, J. Adkins. — M. : Mir, 1965. — 456 p.
  12. Rankin, C.C. An element independent corotational procedure for the treatment of large rotations [Text] / C.C. Rankin, F.A. Brogan // J. of Pressure Vessel Technology. — 1986. — Vol. 108, May. — P. 165–174.
  13. Nour-Omid, B. Finite rotation analysis and consistent linearization using projectors [Text] / B. Nour-Omid, C.C. Rankin // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. — 1991. — Vol. 93. — P. 353–384.
  14. Samul, V.I. Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity [Text] / V.I. Samul. — M., 1982.
  15. Structural materials: Handbook [Text] / B.N. Arzamasov, V.A. Brostrem, N.A. Bushe etc. — M. : Mashinostroenie, 1990.
  16. Eggert, G.M. An adaptive descent method for nonlinear viscoplasticity [Text] / G.M. Eggert, P.R. Dawson, K.K. Mathur // Int. J. for Numerical Methods in Engineering. — 1991. — Vol. 31. — P. 1031–1054.
  17. Schweizerhof, K.H. Consistent linearization for path following methods in nonlinear FE analysis [Text] / K.H. Schweizerhof, P. Wriggers // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. — 1986. — Vol. 59. — P. 261–279.
-

УДК 624.072

А.Г. ИЛИЗАРОВ, А.А. КОЯНКИН

## АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПРОГИБОВ ИЗГИБАЕМОЙ БАЛКИ КУСОЧНО-ПОСТОЯННОГО СЕЧЕНИЯ, ВЫПОЛНЯЕМОГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕРЫВАТЕЛЕЙ ГЕРСЕВАНОВА

Разработана методика расчета прогибов балок кусочно-постоянного сечения, основанная на применении прерывателей Герсеванова, которая позволяет значительно упростить процесс выполнения расчета.

**Ключевые слова:** балка кусочно-постоянного сечения, прерыватели Герсеванова, дифференциальное уравнение изгиба.

В строительстве применение балок кусочно-постоянного сечения различной формы достаточно распространено, что связано, в первую очередь, с экономичным расходованием материалов на изготовление и возведение конструкций. Использование стержневых элементов вышеуказанного сечения, работающих на изгиб, приводит к существенному снижению массы конструкции, экономии материалов и, как следствие, к удешевлению стоимости строительства. Таким образом, актуальным является вопрос разработки простых методик расчета элементов, подвергающихся плоскому изгибу.

Расчет изгибающейся балки с помощью дифференциального уравнения изгиба  $\frac{d^2w}{dx^2} = \frac{M}{D}$  достаточно легко производить для элементов постоянного сечения, а также для элементов, размеры сечения которых изменяются согласно какой-либо математической функции. В случае же применения балки кусочно-постоянного сечения для расчета потребуется условное разделение балки на отдельные участки постоянного сечения с интегрированием их и «стыковкой» между собой из условия неразрывности деформаций. Также можно провести расчет приведением сечения балки к постоянному и соответствующим приведением эпюру внутренних силовых факторов.

С целью упрощения расчета балок кусочно-постоянного сечения предложено использование в дифференциальном уравнении изгиба функциональных прерывателей, которые были применены Н.М. Герсевановым [1, 2] для описания приложения разных по виду нагрузок (равномерно-распределенные силы, сосредоточенные силы и сосредоточенные моменты) в одном алгебраическом уравнении.

Односторонний прерыватель  $\Gamma_a$  Н.М. Герсеванов предложил использовать в качестве представления однократного резкого изменения интенсивности равномерно-распределенной нагрузки:

$$\Gamma_a = \lim_{\pi \frac{\eta < 0}{\eta \rightarrow 0}} \operatorname{arctg} \frac{\eta}{x - a}, \quad (1)$$

где  $x$  и  $\eta$  — переменные величины;  
 $a$  — координата по оси  $x$ , которая указывает место изменения интенсивности нагрузки.

Смысл функции, характеризующей односторонний прерыватель, заключается в том, что при  $x < a \Gamma_a = 0$ ; при  $x > a \Gamma_a = 1$ ; при  $x = a$  функция прерывается и условно принято  $\Gamma_a = \frac{1}{2}$ .

Двусторонний прерыватель  $\Gamma_a^b$  Н.М. Герсеванов применил к описанию равномерно-распределенной нагрузки, приложенной в промежутке между  $a$  и  $b$ . При  $x < a$  или  $x > b \Gamma_a^b = 0$ ; при  $x > a$ , но  $x < b \Gamma_a^b = 1$ ; при  $x = a$  или  $x = b \Gamma_a^b = \frac{1}{2}$  — разрыв функции.

Формула двустороннего прерывателя:

$$\Gamma_a^b = \Gamma_a - \Gamma_b. \quad (2)$$

Мгновенный прерыватель первого порядка  $\Gamma'_a$ :

$$\Gamma'_a = \frac{1}{\pi} \lim_{\substack{\eta < 0 \\ \eta \rightarrow 0}} \frac{\eta}{(x-a)^2 + \eta^2}, \quad (3)$$

равен нулю при  $x \neq a$  и при  $x = a \Gamma'_a = \infty$ . Данный прерыватель отображает приложенную сосредоточенную силу.

Применительно к кусочно-постоянной жесткости предложено описание локального выреза в балке за счет использования мгновенного прерывателя первого порядка  $\Gamma'_a$ , а для учета изменения сечения с дальнейшим сохранением измененного значения предложен односторонний  $\Gamma_a$  или двусторонний  $\Gamma_a^b$  функциональный прерыватель.

Для применения функциональных прерывателей Герсеванова в дифференциальном уравнении изгиба балки, с целью возможности дальнейшего интегрирования, необходимо расположение прерывателей в числителе правой части уравнения. При этом правая часть рассматривается как функция, образованная делением функции  $M(x)$  (постоянной или переменной) на кусочно-постоянную по длине элемента функцию  $D(x)$ . В результате получится кусочно-постоянная или кусочно-переменная функция  $\frac{M}{D}(x)$ , зависящая от координаты  $x$  (рис. 1).

В итоге функцию  $\frac{M}{D}(x)$ , изображенную на рис. 1, в, через прерыватели Герсеванова можно записать:

$$\frac{M}{D}(x) = \frac{M(x)}{D} - \left( \frac{M(x)}{D} - \frac{M(x)}{D_1} \right) s \Gamma'_{x1} - \left( \frac{M(x)}{D} - \frac{M(x)}{D_1} \right) \Gamma_{x2}, \quad (4)$$

где  $s$  — ширина локального выреза.

Общее выражение при условии, что нагрузка постоянна и равна  $q$ , примет вид:

$$\begin{aligned}
 \frac{M}{D}(x) = & \frac{M(x)}{D} - \sum_{i=1}^n \left( \frac{M(x)}{D} - \frac{M(x)}{D_i} \right) s \Gamma'_{xi} - \sum_{j=1}^m \left( \frac{M(x)}{D} - \frac{M(x)}{D_j^{j+1}} \right) \Gamma_{xj}^{xj+1} - \\
 & - \left( \frac{M(x)}{D} - \frac{M(x)}{D_k} \right) \Gamma_{xk} = \frac{M(x)}{D} - \sum_{i=1}^n \Delta \frac{M(x)}{D_i} s \Gamma'_{xi} - \\
 & - \sum_{j=1}^m \Delta \frac{M(x)}{D_j} \Gamma_{xj}^{xj+1} - \Delta \frac{M(x)}{D_k} \Gamma_{xk}, \tag{5}
 \end{aligned}$$

$$\text{где } \Delta \frac{M(x)}{D_i} = \frac{M(x)}{D} - \frac{M(x)}{D_i};$$

$$\Delta \frac{M(x)}{D_j} = \frac{M(x)}{D} - \frac{M(x)}{D_j^{j+1}};$$

$$\Delta \frac{M(x)}{D_k} = \frac{M(x)}{D} - \frac{M(x)}{D_k}.$$

Таким образом, общее дифференциальное уравнение изгиба балки кусочно-постоянного сечения примет вид:

$$\begin{aligned}
 \frac{d^2w}{dx^2} = & \frac{M(x)}{D} - \sum_{i=1}^n \left( \frac{M(x)}{D} - \frac{M(x)}{D_i} \right) s \Gamma'_{xi} - \sum_{j=1}^m \left( \frac{M(x)}{D} - \frac{M(x)}{D_j^{j+1}} \right) \Gamma_{xj}^{xj+1} - \\
 & - \left( \frac{M(x)}{D} - \frac{M(x)}{D_k} \right) \Gamma_{xk} = \frac{M(x)}{D} - \sum_{i=1}^n \Delta \frac{M(x)}{D_i} s \Gamma'_{xi} - \\
 & - \sum_{j=1}^m \Delta \frac{M(x)}{D_j} \Gamma_{xj}^{xj+1} - \Delta \frac{M(x)}{D_k} \Gamma_{xk}. \tag{6}
 \end{aligned}$$

Данное уравнение достаточно легко интегрируется.

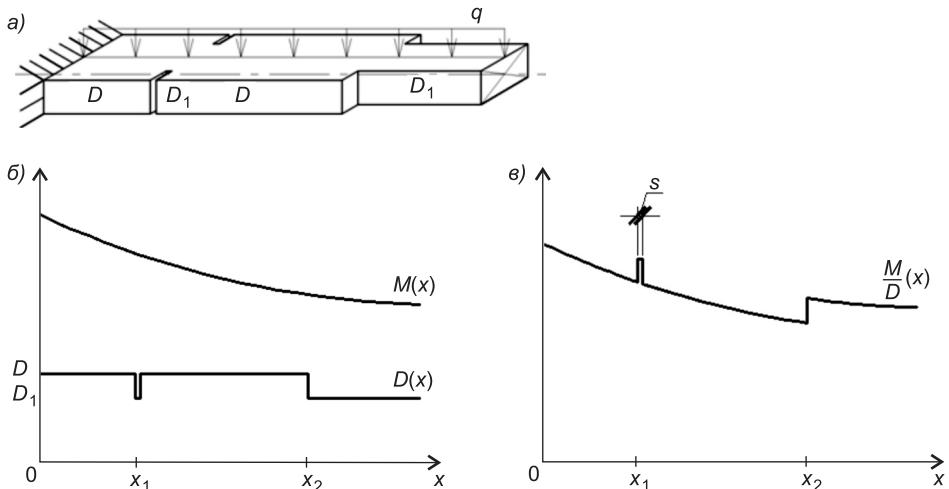


Рис. 1. Приведение функции  
а — схема балки; б — графики функций  $M(x)$  и  $D(x)$ ; в — график функции  $\frac{M}{D}(x)$

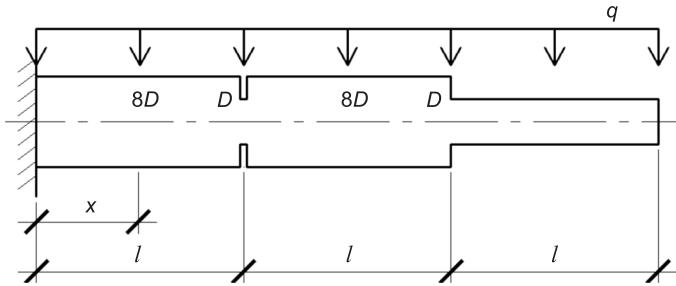


Рис. 2. Балка кусочно-постоянного сечения

Для примера приведен расчет консольной балки кусочно-постоянного сечения, которая загружена равномерно-распределенной нагрузкой (рис. 2).

Величина равномерно-распределенной нагрузки постоянна и составляет  $q$ , а значение момента определяется по формуле  $M(x) = \frac{q(3l - x)^2}{2}$ .

Таким образом, дифференциальное уравнение запишется следующим образом:

$$\frac{d^2w}{dx^2} = \frac{M}{D}(x) = \frac{q(3l - x)^2}{2} \left( \frac{1}{8D} - \Delta \frac{1}{D} s\Gamma_l' - \Delta \frac{1}{D} \Gamma_{2l} \right),$$

и так как  $\Delta \frac{1}{D} = \frac{1}{8D} - \frac{1}{D} = -\frac{7}{8D}$ , то выражение примет вид:

$$\frac{d^2w}{dx^2} = \frac{q(3l - x)^2}{2} \left( \frac{1}{8D} + \frac{7}{8D} s\Gamma_l' + \frac{7}{8D} \Gamma_{2l} \right).$$

Интегрируя полученное выражение один раз и принимая, что при  $x = 0 \varphi = \frac{d\omega}{dx} = 0$ , получим следующую функцию:

$$\begin{aligned} \varphi = \frac{d\omega}{dx} = \frac{q}{2} & \left( \frac{1}{8D} \left( 9l^2 x - 3lx^2 + \frac{x^3}{3} \right) + \frac{7}{2D} l^2 s\Gamma_l + \right. \\ & \left. + \frac{7}{8D} \left( 9l^2 x - 3lx^2 + \frac{x^3}{3} - \frac{26l^3}{3} \right) \Gamma_{2l} \right). \end{aligned}$$

Интегрируя полученное выражение еще раз и принимая, что при  $x = 0 \omega = 0$ , получим функцию прогибов жестко защемленной балки:

$$\begin{aligned} \omega = \frac{q}{2} & \left( \frac{1}{8D} \left( \frac{9l^2}{2} x^2 - lx^3 + \frac{x^4}{12} \right) + \frac{7}{2D} l^2 s(x-l) \Gamma_l + \right. \\ & \left. + \frac{7}{8D} \left( \frac{9l^2}{2} x^2 - lx^3 + \frac{x^4}{12} - \frac{26l^3}{3} x + 6l^4 \right) \Gamma_{2l} \right). \end{aligned}$$

В итоге величина прогиба свободного конца балки составляет

$$\omega(3l) = \frac{ql^4}{2} \left( \frac{81}{32D} + \frac{7}{50D} + \frac{7}{32D} \right) = \frac{289ql^4}{200D}$$

при условии, что ширина локального выреза равна  $s = \frac{l}{50}$ .

Приняв, что  $l = 0,5$  м,  $q = 1$  кН,  $D = EJ = 45$  кН·м<sup>2</sup>,  $s = \frac{l}{50} = 1$  см, получаем величину прогиба свободного конца балки:

$$w(3) = \frac{1 \cdot 1^4}{2} \left( \frac{81}{32 \cdot 45} + \frac{7}{50 \cdot 45} + \frac{7}{32 \cdot 45} \right) \cdot 1000 = \\ = 28,12 + 1,56 + 2,43 = 32,11 \text{ мм.}$$

При этом величина прогиба включает в себя три составляющие:  
 $\frac{81ql^4}{64D} = 28,12$  мм — прогиб балки постоянного сечения жесткостью  $8D$ ;  
 $\frac{7ql^4}{100D} = 1,56$  мм — дополнительный прогиб балки, возникающий от наличия локального выреза (жесткость в месте локального выреза составляет  $D$ );

$\frac{7ql^4}{64D} = 2,43$  мм — дополнительный прогиб балки, возникающий от уменьшения ширины сечения балки со стороны свободного конца (жесткость на свободном конце балки составляет  $D$ ).

С целью проверки точности предложенной методики расчета были рассчитаны балки кусочно-постоянного сечения в ПК SCAD в линейной постановке задачи. При этом рассматривались три варианта моделирования балки: стержневые КЭ, пластинчатые КЭ и объемные КЭ. Результаты расчетов приведены в таблице.

Эскиз	Точки	Прогиб, мм			
		Расчет	SCAD		
			стержни	пластины	объем
	т. 1	4,98	4,98	4,96	4,91
	т. 2	16,52	16,52	16,42	16,76
	т. 3	32,11	32,11	31,90	32,57

Прогибы, полученные в результате расчета по предложенной методике, имеют хорошую сходимость с результатами расчетов, полученными в ПК SCAD. Расхождение в значениях не превысило 2 % и об разуется:

— за счет погрешности приведения реальной ширины локального выреза к нулевой ширине (приведение к мгновенному прерывателю Герсеванова  $G'_{xi}$ ), что упрощает расчет. Для достижения большей точности определения значения на указанном участке возможно применение двустороннего прерывателя Герсеванова;

— неучета концентраций напряжений в местах скачкообразного изменения сечения балки (исследования в данном направлении продолжаются).

**Вывод.** Предложенная методика расчета прогиба изгибаемого элемента, использующая функциональные прерыватели Герсеванова, позволяет произвести достаточно точный линейный расчет балок кусочно-постоянного сечения, при этом значительно упрощается процесс проведения расчета.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Т р а в у ш, В.И. Функциональные прерыватели Герсеванова и расчет конструкций на упругом основании [Текст] / В.И. Травуш // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2000. — № 4. — С. 18–23.
2. Г е р с е в а н о в, Н.М. Основания и фундаменты [Текст] / Н.М. Герсеванов, Д.Е. Польшин, Г.И. Покровский, В.Г. Булычев, Б.П. Попов, Р. Шеляпин. — М. : Госстройиздат, 1933. — 135 с.

*ИЛИЗАРОВ Александр Гаврилович, канд. техн. наук, доц.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*КОЯНКИН Александр Александрович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: KoyankinAA@mail.ru*

*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск*

Получено после доработки 10.07.14

**Ilizarov Alexander Gavrilovich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Koyankin Alexander Alexandrovich**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: KoyankinAA@mail.ru., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

#### **DIFFERENTIAL EQUATION OF THE BENDING OF BEAMS OF VARIABLE CROSS-SECTION IS DESCRIBED WITH THE HELP OF BREAKERS GERSEVANOV**

Developed methodology for calculation of deflection of the beams piecewise constant cross section, based on the use of breakers Gersevanov, which allows to simplify the process of calculation.

Key words: beam piecewise constant cross section, the breakers Gersevanov, differential equation of bending.

#### REFERENCES

1. Travush, V.I. Functional breakers Gersevanov and calculation of structures on elastic foundation [Text] / V.I. Travush // Grounds, foundations and mechanics of soil. — 2000. — N 4. — P. 18–23.
2. Gersevanov, N.M. Bases and foundations [Text] / N.M. Gersevanov, D.E. Polshin, G.I. Pokrovsky, V.G. Bulychev, B.P. Popov, R. Shelyapin. — M. : Gosstroyizdat, 1933. — 135 p.

УДК 624.074.43:691.328

К.В. ТАЛАНТОВА

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАСХОДА СТАЛЬНОЙ ФИБРЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА

Для оптимизации расхода фибр при проектировании конструкций на основе сталефибробетона автором предложен относительный коэффициент их расхода на растяжение  $k_{fbt}$  и на сжатие  $k_{fb}$ . При определении последних требуется оценить объемный коэффициент расхода фибр  $\mu_{fv}$ , соответствующий наименьшему относительному коэффициенту  $k_{fbtmin}$ , который рассчитывается при условии равенства расчетного сопротивления сталефибробетона  $R_{fbt}$  на растяжение максимальному нормальному напряжению растяжения от внешних нагрузок  $\sigma_{tmax}$  с помощью предложенных в работе зависимостей. При этом должно соблюдаться условие  $\mu_{fv} \geq 0,005$ . На свойства сталефибробетона влияет большое количество параметров, которые находятся во взаимодействии друг с другом. В связи с этим для выполнения оптимизационных расчетов с учетом большого количества данных были разработаны программные средства, которые позволили решить поставленную задачу.

**Ключевые слова:** сталефибробетон, стальная фибра, относительный коэффициент расхода фибр, оптимизация, параметры оптимизации, программные средства.

Известно, что объемное содержание фибр в сталефибробетоне является одним из важнейших параметров, определяющих его свойства [1].

Корреляционный анализ свойств сталефибробетона (СФБ), выполненный в рамках представляемых исследований с использованием результатов работ отечественных и зарубежных ученых [2–7 и др.], подтвердил определяющую роль объемного содержания фибр  $\mu_{fv}$  для обеспечения его физико-механических характеристик. При этом стальная фибра — наиболее дорогостоящий компонент СФБ. Результаты корреляционного анализа СФБ послужили основанием для постановки и решения задачи оптимизации расхода фибр при разработке конструкций на его основе, что позволяет обеспечить заданные свойства материала проектируемой конструкции, а также ее эксплуатационные характеристики.

В качестве исходных данных для решения задачи оптимизации приняты:

— типы фибр, определяющие их расчетные сопротивления  $R_{sf}$ , МПа, и коэффициент сцепления фибр с бетоном-матрицей  $\eta$ , который принят в соответствии с «Рекомендациями»<sup>1</sup> и СП<sup>2</sup>;

— размеры сечения  $b$  и  $h$ , мм;

— класс и тип бетона, определяющие функциональную связь между расчетным сопротивлением бетона на растяжение  $R_{bt}$ , МПа, и сжатие  $R_b$ , МПа, принятые в соответствии со СНиП 2.03.01–84\*.

<sup>1</sup> Рекомендации по проектированию и изготовлению сталефибробетонных конструкций / НИИЖБ Госстроя СССР. М., 1987. 148 с.

<sup>2</sup> СП 52-104-2006. Свод правил по проектированию и строительству: сталефибробетонные конструкции (к СНиП 52-01–2003). М.: ФГУП НИЦ «Строительство», 2007. 56 с.

**Параметры оптимизации:** диаметр (приведенный диаметр) фибры  $d_f$ , мм; отношение длины фибры к ее диаметру  $l_f/d_f$ , расчетное сопротивление исходного бетона сжатию  $R_b$ , МПа, которые принимают нижеследующие значения в принятой области фибрового армирования и прочности бетона по СНиП 2.03.01–84\* и СП 52-104–2006:

$$d_f = (0,1; 0,12; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2), \text{ мм};$$

$$l_f/d_f = (50; 75; 100; 125);$$

$$R_b = (8,5 \dots 33,0), \text{ МПа}.$$

**Задача оптимизации:** определение минимального относительного коэффициента расхода фибр на растяжение  $k_{fbtmin}$  [8] при обеспечении равенства расчетного сопротивления СФБ на растяжение максимальному значению нормального напряжения растяжения (или главному напряжению растяжения  $\sigma_{mt}$ ). Последние должны быть получены в результате статического расчета проектируемой конструкции с помощью программных средств, реализующих метод конечных элементов, от действия наиболее невыгодного сочетания нагрузок, т.е.  $R_{fbt} = \sigma_{tmax}$ .

Коэффициенты ориентации фибр  $k_{or}$  могут быть выбраны из таблиц «Рекомендаций» и/или СП.

Как правило, оптимизация выполняется с определением экстремумов [9], но поскольку в задаче рассматривается большое количество параметров, влияющих друг на друга, данная задача оптимизации решается методом простого перебора (рисунок). В результате оптимационных расчетов с помощью программы определяется минимальный относительный коэффициент расхода фибры  $k_{fbtmin}$  и соответствующие ему объемный коэффициент фибрового армирования  $\mu_{fv}$  (формулы (1) и (2)),  $d_f$ ,  $l_f/d_f$ ,  $R_b$ , которые используются при подготовке исходных данных при проектировании сталефибробетонных (СФБК) или сталефиброжелезобетонных конструкций (СФЖБК).

$$\mu_{fv} = \frac{\left( \frac{\sigma_{mt}}{m_1} - R_b \right) 0,08}{\left[ k_{or}^2 R_{sf} \left( 1 - \frac{l_{fan}}{l_f} \right) - R_b 5,5 \right]} \quad \text{при } l_{fan} < \frac{l_f}{2}; \quad (1)$$

$$\mu_{fv} = \frac{\left( \frac{\sigma_{mt}}{m_2 R_b} - 0,08 \right)}{\left[ k_{or}^2 \frac{l_f}{4 \eta d_f} - 5,5 \right]} \quad \text{при } l_{fan} \geq \frac{l_f}{2}. \quad (2)$$

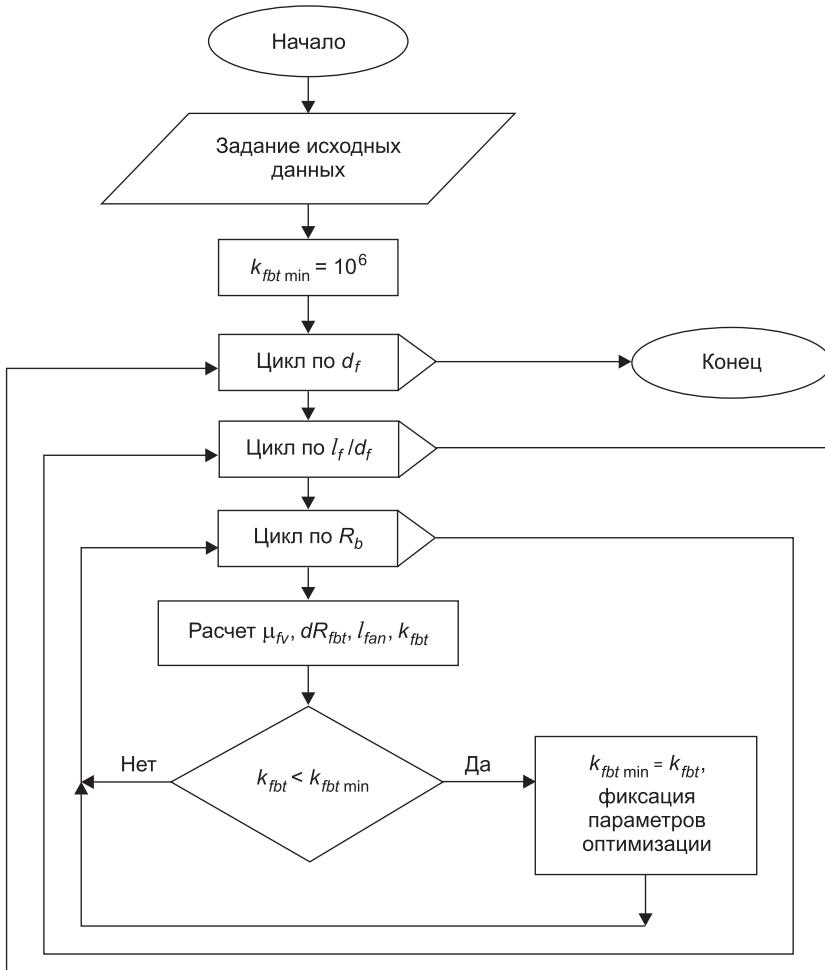
Относительный коэффициент расхода фибры на растяжение можно определить с помощью формул (3) или (4).

$$k_{fbt} = \frac{\left[ k_{or}^2 \frac{l_f}{4 \eta d_f} - 5,5 R_b \right] \cdot 7800}{\left( \frac{\sigma_{mt}}{m_2 R_b} - 0,08 R_b \right) \cdot \delta R_{fbt}} \quad \text{при } l_{fan} \geq \frac{l_f}{2}; \quad (3)$$

$$k_{fbt} = \frac{\left[ \frac{\sigma_{mt}}{m_1} - 0,08R_b \right] \cdot 7800}{\left[ k_{or}^2 R_{sf} \left( 1 - \frac{l_f}{4\eta d_f} \right) - 5,5R_b \right] \cdot \delta R_{fbt}} \quad \text{при } l_{fan} < \frac{l_f}{2}. \quad (4)$$

После вычисления минимального относительного коэффициента расхода фибры на растяжение требуется определить аналогичный коэффициент на сжатие. Для решения оптимизационной задачи на сжатие используются те же исходные данные и тот же метод, что и на растяжение. Для расчетного сопротивления СФБ на сжатие также принимается его равенство максимальному нормальному напряжению сжатия  $R_{fb} = \sigma_{cmax}$  (или  $\sigma_{mc}$ ) при минимальном относительном коэффициенте расхода фибр на сжатие  $k_{fbtmin}$ .

При определении напряжений от внешних нагрузок  $\sigma_{mt}$  ( $\sigma_{tmax}$ ) и  $\sigma_{mc}$  ( $\sigma_{cmax}$ ) целесообразно использовать программные средства типа SCAD, Лира, Cosmos и др., позволяющие в результате расчета получить карты полей напряжений, с помощью которых формируются схемы фибрового армирования элементов конструкций на основе СФБ.



Блок-схема алгоритма оптимизации

Для определения сопротивления СФБ сжатию, как и сопротивления растяжению, можно воспользоваться формулами, приведенными в «Рекомендациях» и СП. Коэффициенты ориентации фибры при оценке прочности СФБ на сжатие  $k_n$  выбираются из таблицы по «Рекомендациям».

Относительный коэффициент расхода фибр на сжатие определяется с помощью зависимости

$$k_{fb} = \frac{(\sigma_{mc} - R_b) \cdot 7800}{k_n^2 \Phi_f R_{sf} \delta R_{fb}}. \quad (5)$$

Когда прочность при сжатии в СФБК является определяющим показателем, следует установить минимальный коэффициент расхода фибры при сжатии  $k_{fbmin}$ , затем выбрать соответствующие ему  $\mu_{fv}$ ,  $d_f$ ,  $l_f/d_f$ ,  $R_b$ . Потом проверить относительный коэффициент расхода фибры при сжатии и оценить обеспеченность прочности СФБ при растяжении в случае использования параметров, принятых по сжатию. При необходимости откорректировать.

Поскольку программные модули определяют  $k_{fbmin}$  и  $k_{fbmin}$  для каждого типа фибры из приведенных в «Рекомендациях» и СП, всего используется 18 типов фибр (табл. 1), пользователю предоставляется возможность выбора из принятой российскими документами базы данных.

Таблица 1. Характеристика стальной фибры, принятой в исследованиях

Вид фибровой арматуры	Расчетное сопротивление фибры, $R_{sf}$ , МПа	Коэффициент сцепления фибры, $\eta$
Из проволоки малоуглеродистой общего назначения (ТУ 14-4-1093-86): — профилированной — гладкой — покрытой полимерцементной композицией	— 500 —	0,6 1,2 0,5
Из стального листа (ТУ 21-33-60-86)	200	0,8
Из отработанных канатов (ТУ 67-797-86)	550	0,9
Стальная резаная из стального холоднокатаного листа, по ТУ 0991-123-53832025-2001 соответственно из стали марок: Ст.08кп Ст.20	440 580	0,8 0,8
Стальная, фрезерованная из слябов, отвечающая ТУ 0882-193-46854090	300	0,8
FIBREX стальная, резаная из стального листа, отвечающая ТУ 0991-123-53832025 соответственно из стали класса по прочности: 1 2 3	440 520 580	0,6 0,6 0,6
Стальная рубленая из проволоки, отвечающая ТУ 1211-205-46854090: ХЕНДИКС XENDIX МИКСАРМ MIXARM ТВИНФЛЭТ TWINFLAT	950 1050 1050	0,9 0,70 0,75
Литая	190	0,7
Из токарной заготовки	400	0,6

Определение минимального относительного коэффициента расхода фибр на растяжение и сжатие осуществлялось с помощью программного обеспечения, разработанного автором в среде табличного процессора Excel с использованием языка программирования VBA (Visual Basic for Application). Программа позволяет установить в автоматическом режиме минимально необходимый расход фибр, соответствующий НДС конструкции, а также параметры фибрового армирования и исходного бетона. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2012619865 от 31.10.12. Фрагменты результатов работы программы представлены в табл. 2.

Таким образом, предложена оригинальная методика подготовки исходных данных, позволяющая определить область рационального фибрового армирования [10], обеспечивающую заданные прочность и деформативность материала и конструкции при минимальном расходе фибры.

**Таблица 2. Представление результатов работы программы по определению минимального относительного коэффициента расхода фибр. Фрагмент**

Исходные данные		Результаты	
Показатель	Величина	Показатель	Величина
<i>Растяжение</i>			
Напряжение растяжения, $\sigma_{ml}$ , МПа	3,6	Минимальный относительный коэффициент расхода фибр на растяжение, $k_{fibmin}$ , кг / %	0,197
Размеры сечения $b \times h$ , мм	40×20	Объемный коэффициент фибрового армирования, $\mu_{fv}$	0,9
Тип фибры	Из проволоки профилированной	Отношение длины фибры к диаметру, $l_f/d_f$	100
Наличие анкеров	Да	Диаметр фибры, $d_f$ , мм	0,8
Расчетное сопротивление фибры на растяжение, $R_{sf}$ , МПа	500	Расчетное сопротивление исходного бетона на растяжение, $R_{bt}$ , МПа	0,74
		Расчетное сопротивление исходного бетона на сжатие, $R_b$ , МПа	8,5
<i>Сжатие</i>			
Напряжение сжатия, $\sigma_{mc}$ , МПа	30	Минимальный относительный коэффициент расхода фибр на сжатие $k_{fibmin}$ , кг / %	3,97
Размеры сечения $b \times h$ , мм	40×20	Объемный коэффициент фибрового армирования, $\mu_{fv}$	0,005
Тип фибры	Из проволоки профилированной	Отношение длины фибры к диаметру, $l_f/d_f$	50
Наличие анкеров	Нет	Диаметр фибры, $d_f$ , мм	0,25
Расчетное сопротивление фибры на растяжение, $R_{sf}$ , МПа	500	Расчетное сопротивление исходного бетона на растяжение, $R_{bt}$ , МПа	1,59
		Расчетное сопротивление исходного бетона на сжатие, $R_b$ , МПа	27,25

На основе полученных результатов разработаны и прошли экспериментальную проверку СФБ (СФЖБ) конструкции различного назначения с заданными эксплуатационными характеристиками и высокими технико-экономическими показателями [11].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Beddar, M. Fiber reinforced concrete: past, present and future [Текст] / M. Beddar // Бетон и железобетон — пути развития: науч. тр. 2-й Всерос. (Междунар.) конф. по бетону и железобетону. 5–9 сент. 2005 г., Москва; в 5 т. Т. 3: Секционные доклады, секция «Технология бетона». — М. : Дипак, 2005. — С. 228–234.
2. А болиньш, Д.С. Дисперсно хаотически армированный бетон как двухфазный материал и некоторые экспериментальные данные о его прочности при центральном сжатии и изгибе [Текст] / Д.С. Аболиньш, В.К. Кравинскис // Исследования по механике строительных материалов и конструкций. — Рига : РПИ, 1969. — Вып. 4. — С. 117–123.
3. Лобанов, И.А. Особенности структуры и свойства дисперсно-армированных бетонов [Текст] / И.А. Лобанов // Технология изготовления и свойства новых композиционных строительных материалов: межвуз. темат. сб. тр. — Л., 1986. — С. 5–10.
4. Крылов, Б.А. Фибробетон и фибропемент за рубежом [Текст] / Б.А. Крылов. — М., 1979. — 53 с. — (Строительство и архитектура. Серия: Строительные материалы, изделия и конструкции: обзор. информ. / ЦНИИС; вып. 5).
5. Рамачандран, В. Наука о бетоне: физико-химическое бетоноведение [Текст] / В. Рамачандран, Р. Фельдман, Дж. Бодуэн; пер. с англ. Т.И. Розенберг, Ю.Б. Ратиновой; под ред. В.Б. Ратинова. — М. : Стройиздат, 1986. — 278 с.
6. Романов, В.П. Влияние параметров дисперсного армирования на прочность элементов из сталефибробетона при статических и динамических нагрузках [Текст] / В.П. Романов, Ф.Н. Рабинович, И.Д. Захаров // Исследование и расчет новых типов пространственных конструкций гражданских зданий: сб. науч. тр. — Л. : ЛЕНЗНИИЭП, 1985. — С. 88–94.
7. Рыбасов, В.П. К оценке прочности фибробетона [Текст] / В.П. Рыбасов // Фибробетон и его применение в строительстве: сб. науч. тр. — М. : НИИЖБ, 1979. — С. 125–130.
8. Талантова, К.В. Создание элементов конструкций с заданными свойствами на основе сталефибробетона [Текст] / К.В. Талантова // Изв. вузов. Строительство. — 2008. — № 10. — С. 4–9.
9. Дмитриева, Т.Л. Алгоритм решения условно-экстремальных задач, использующий методы модифицированных функций Лагранжа первого и второго порядка [Текст] / Т.Л. Дмитриева // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2010. — № 3 (27). — С. 113–120.
10. Талантова, К.В. Автоматизированное определение области рационального фиброного армирования при проектировании конструкций на основе сталефибробетона [Текст] / К.В. Талантова // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: тез. докл. V Международ. симпоз. (Иркутск, 01–06 июля, 2014 г.).
11. Талантова, К.В. Практика создания конструкций на основе сталефибробетона с заданными эксплуатационными характеристиками [Текст] / К.В. Талантова, Н.М. Михеев, А.Н. Трошkin // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 10. — С. 112–118.

*ТАЛАНТОВА Клара Васильевна, д-р техн. наук, доц.; E-mail: talant\_bar@mail.ru  
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург*

Получено после доработки 14.07.14

**Talantova Klara Vasilievna**, doctor of technical sciences, assistant professor; E-mail: talant\_bar@mail.ru, Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I, Saint-Petersburg, Russia

## **OPTIMIZATION OF THE CONSUMPTION OF STEEL FIBER WHEN DESIGNING STRUCTURES BASED ON STEEL FIBER CONCRETE**

To optimize the consumption of fibers when designing structures based on steel fiber concrete, the author proposes the relative ratio of their consumption on tensile  $k_{fbt}$  and compression  $k_{fb}$ . To determine the latter, it is required to estimate the volume ratio of the consumption of fibres  $\mu_{fv}$  corresponding to the smallest relative ratio  $k_{fbt\min}$ , which is calculated under the condition of equality of the estimated resistance of steel fibre concrete  $R_{fbt}$  on tensile maximum normal tensile strength from external loads  $\sigma_{fmax}$  using the proposed dependencies. It must comply with the condition  $\mu_{fv} \geq 0,005$ . The properties of steel fibre concrete are affected by a large number of parameters that influence each other. Therefore, to perform optimization calculations taking into account the large amount of data, some software tools have been developed, which allowed to solve the problem.

**Key words:** steel fiber concrete, steel fibre, the relative ratio of the consumption of fibers, optimization, parameters of optimization, software tools.

### **REFERENCES**

1. Beddar, M. Fiber reinforced concrete: past, present and future [Text] / M. Beddar // Concrete and reinforced concrete — development path: Scientific proceedings of the 2nd all-Russian (International) conference on concrete and reinforced concrete. 5–9 September 2005, Moscow; in 5 vol., Vol. 3: oral presentations, section «Concrete technology». — M. : Deepak, 2005. — P. 228–234.
2. Abolins h, D.C. Dispersed randomly reinforced concrete as a two-phase material and some experimental data about its strength at the central compression and bending [Text] / D.C. Abolins h, V.K. Kravinskis // Research on the mechanics of building materials and structures. — Riga : RPI, 1969. — Iss. 4. — P. 117–123.
3. Lobanov, I.A. Structure and properties of particulate-reinforced concrete [Text] / I.A. Lobanov // Production technology and properties of new composite building materials. — L., 1986. — P. 5–10.
4. Krylov, B.A. Fiber-reinforced concrete and cement abroad [Text] / B.A. Krylov. — M., 1979. — 53 p. — (Construction and architecture. Series: Building materials, products and structures: overview information / TSINIS; iss. 5).
5. Ramachandran, V. The science of concrete: physical and chemical concrete sciences [Text] / V. Ramachandran, R. Feldman, J. Baudouin; translation from english T.I. Rosenberg, Yu.B. Retinova; edited by V.B. Retinova. — M. : Stroyizdat, 1986. — 278 p.
6. Romanov, V.P. Influence of parameters of the dispersed reinforcement on the strength of the elements of the steel fibre concrete under static and dynamic loads [Text] / V.P. Romanov, F.N. Rabinovich, I.D. Zakharov // Research and analysis of new types of spatial structures of civil buildings: collection of scientific proceedings. — L. : LENZMIIEP, 1985. — P. 88–94.
7. Rybasov, V.P. Estimating strength of fiber-reinforced concrete [Text] / V.P. Rybasov // Fiber-reinforced concrete and its use in construction: collection of scientific proceedings. — M. : NIIZHb, 1979. — P. 125–130.
8. Talantova, K.V. Creation of structural components with specified features basedon steel fibrous concrete [Text] / K.V. Talantova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2008. — N 10. — P. 4–9.

9. Dmitrieva, T.L. Algorithm for solving conditional extremal problems, using methods modified Lagrangian functions of the first and second order [Text] / T.L. Dmitrieva // Modern technologies. System analysis. Modeling. — Irkutsk : Publishing company IrGups, 2010. — N 3 (27). — P. 113–120.
  10. Talantova, K.V. Automated determination of the field of rational fiber reinforcement in the design of structures on the basis of the steel fibre concrete [Text] / K.V. Talantova // Actual problems of computer simulation of structures and buildings: abstracts of the V<sup>th</sup> International Symposium (Irkutsk, 01–06 July, 2014).
  11. Talantova, K.V. The practice of creating structures based on steel fiber concrete with preset properties [Text] / K.V. Talantova, N.M. Mikheev, A.N. Troshkin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 10. — P. 112–118.
-

**УДК 624.131.543+624.15+69.059.22**

**С.Н. ЧЕРНЫШЕВ, И.М. ЕВГРАФОВА, М.А. НЕКЛЮДОВ**

**О ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СКОРОСТИ  
ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ  
У БОРТА ДОЛИНЫ РЕКИ КАК ПРИЧИНЕ ДЕФОРМАЦИЙ  
И РАЗРУШЕНИЯ СООРУЖЕНИЙ**

**(к 125-летию со дня рождения И.В. Попова)**

Скорость медленного пластического течения грунтов на строительных площадках, прилежащих к крутым бортам долины реки, почти не принималась в прошлом и обычно не принимается во внимание при проектировании и строительстве зданий вблизи коренного борта долины и уступов террас. Цель статьи — обратить внимание строителей на факт существования горизонтального движения массивов дисперсных грунтов рядом с глубокими естественными и искусственными врезами. В статье рассмотрены деформации памятников архитектуры, жилых и нежилых зданий, расположенных на поверхностях высоких террас и на водораздельных равнинах вблизи круtyх бортов долин рек и оврагов. Анализируются деформации памятников архитектуры монастыря в г. Киржач Владимирской области, различных зданий по правому берегу р. Москвы в районе Воробьевых гор. Указан порядок величины горизонтальных скоростей и ширина зоны их проявления.

**Ключевые слова:** пластическое течение грунтов, речная долина, деформация зданий, грунтовые массивы, дисперсные грунты, оползни, фундаменты.

Ровные строительные площадки над крутым берегом реки всегда были привлекательны для архитекторов, строивших капитальные здания, предназначенные стать памятником. Таков архитектурный шедевр первой половины XVI в. — храм Вознесения Господня. Храм стоит на меловых и юрских песчано-глинистых отложениях на высоте 25 м над р. Москвой, на удалении 120 м от русла. Непосредственно от него идет к реке относительно пологий борт долины. Ось шатрового храма почти вертикальна. Древние строители поставили его на фундаментную плиту толщиной от 4 до 7 м в разных ее частях [1]. Фундамент и мощные монолитные стены предохраняли памятник от деформаций, связанных с движением грунтов на склонах. Так, с учетом возможных подвижек на склоне было построено здание в XVI в. К сожалению, впоследствии возможность медленного движения склона зачастую не учитывалась.

Строительство храма Христа Спасителя в память победы над Наполеоном было начато на Воробьевых горах на водораздельной равнине на высоте около 70 м над рекой близ бровки коренного склона. В фундаментах в силу горизонтального движения грунта до начала возведения стен образовались трещины. Строительство было остановлено, а позже храм-памятник возведен на другой площадке, в центре Москвы. Забыв об ошибке XIX в., сталинские архитекторы в середине XX в. на генплане Москвы разместили высотное здание МГУ вновь на бровке Воробьевых гор.

Специальное личное обращение к И.В. Сталину крупнейшего специалиста в инженерной геологии проф. И.В. Попова, заведующего кафедрой инженерной геологии МИСИ, привело к пересмотру планировочного решения: здание отодвинуто на расстояние до 1400 м от бровки долины за зону горизонтальных пластических деформаций, благополучно построено и эксплуатируется.

В 2014 г. научной общественностью отмечается 125-летие Ивана Васильевича Попова. Эту публикацию мы посвящаем его памяти, памяти инженера, который глубоко понимал значение описываемого нами процесса, гражданская позиция которого была выше опасения репрессий. Однако опыт изменения планировочного решения по МГУ был забыт, когда через четверть века место для высотного здания президиума АН СССР выбрали снова на бровке коренного борта долины Москвы-реки на пл. Гагарина. Здание заложили на высоте 32 м над рекой непосредственно над бортом глубокого Андреевского оврага и в 40–50 м от крутого борта долины реки. В подземной части его, в начале строительства в 1983 г. образовались трещины [2]. Строительство было приостановлено. В течение ряда лет площадка и прилегающие склоны проверялись учеными Института литосферы АН СССР (директор академик Е.М. Сергеев, руководитель работ Г.Л. Кофф) с привлечением ПНИИИСа, Фундаментпроекта и других организаций. Выводы инженеров-геологов позволили продолжить строительство при условии принятия конструктивных мер по укреплению фундаментов.

Рядом с упомянутым зданием РАН на пл. Гагарина, по другую сторону Андреевского оврага на рубеже 1940–1950-х гг. были построены два жилых кирпичных многоэтажных здания (дома № 30 и 37а по Ленинскому проспекту) на ленточных фундаментах. Овраг, ныне занятый туннелями Окружной железной дороги и Третьего транспортного кольца, имел на рассматриваемом участке глубину от 12 до 15 м и крутые борта, с уклоном порядка 1/2. Здания находятся на расстоянии 34 и 42 м от бровки оврага. В основании зданий, как и в основании комплекса РАН, лежит аллювий третьей надпойменной террасы, меловые и юрские отложения. Отложения террасы представлены песками кварцевыми средней крупности, реже мелкими и крупными, среди меловых отложений преобладают супеси и пески пылеватые. Юрские отложения, залегающие на уровне на 10 м выше уреза реки, представлены мелкими и пылеватыми песками. Глинистые отложения юры вскрыты на уровне уреза воды в реке. Они, казалось бы, не должны оказывать существенного влияния на рассматриваемый процесс. Однако это вопрос интерпретации фактов, а факты заключаются в следующем.

В течение 50 лет дома стояли над оврагом, в котором еще до их постройки проходила Окружная железная дорога. Около дома 37а, в 8 м от фундамента находится станция метро «Ленинский проспект» неглубокого заложения. Песчаные основания зданий испытывали вибрацию от движения поездов. До строительства туннелей дома в частях, соседних с оврагом, были разбиты многочисленными трещинами шириной до 10 мм. На расстоянии 100 м от борта Андреевского оврага в доме 30 и 120 м в доме 37а раскрытие трещин прекращалось. Это свидетельствовало о том, что процесс горизонтального перемещения грунтов идет до

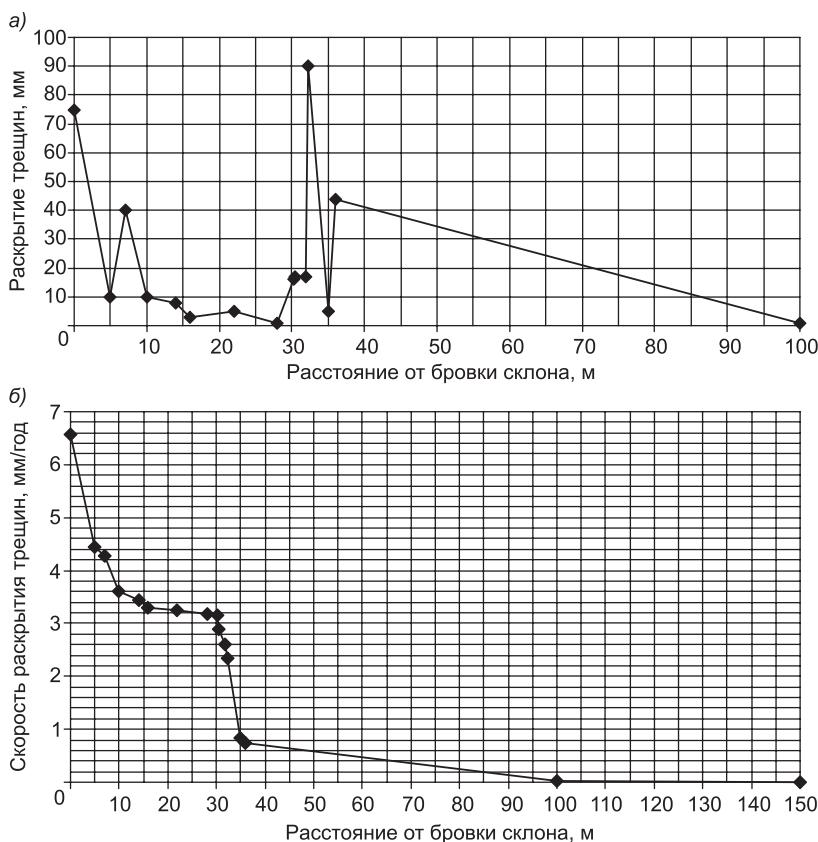
расстояния примерно 100 м от бровки оврага. Особенно много трещин было в сводах арочных проемов. Фундаменты зданий кирпичные, не армированные. Пяты арок не связаны связями. На уровне фундаментов связи также, вероятно, отсутствуют. Вследствие этого, по аркам проходили трещины.

Здания были обследованы НИИОСП перед строительством Третьего транспортного кольца. По выводам НИИОСП в ходе строительства туннелей приняты меры для снижения опасных воздействий на уже деформированные здания. После завершения строительства фасады домов были отремонтированы. За последующие 12 лет трещины не увеличивали ширину раскрытия. Ранее трещины прогрессировали, что требовало частых ремонтов фасадов этих заметных в архитектуре Москвы домов, оформляющих парадный въезд в Москву сталинской эпохи. Даже вибрация от поездов не стимулирует их появление.

Можно однозначно констатировать, что трещины были связаны с горизонтальным медленным движением песчаных и супесчаных грунтов в сторону оврага. Причина прекращения роста ширины трещин в том, что тунNELи полностью заняли объем природной выемки, создали подпор основаниям зданий, существенно улучшили геоэкологическую обстановку на пл. Гагарина в Москве. Можно сделать вывод, что ленточные неармированные фундаменты с отсутствием связи под проездными арками не пригодны для зданий, находящихся в зоне горизонтальных пластических деформаций грунтов у склона. Даже песчаные грунты за пределом прizмы обрушения по углу естественного откоса испытывают медленное течение в сторону выемок.

В аналогичных инженерно-геологических условиях находится жилой дом 6 по ул. Косыгина (ныне не эксплуатируемый) и гаражные постройки. В указанном доме, расположенному над крутым коренным берегом р. Москвы, имеются многочисленные трещины в кладке несущих стен, свидетельствующие об его растяжении, вследствие пластической деформации растяжения основания в связи с нахождением у бровки над обрывом к долине. Дом построен из серого силикатного кирпича в 1954 г. на месте пришедшего в негодность здания конюшни усадьбы Мамоновых.

Здание имеет в плане прямоугольную форму, вытянутую перпендикулярно долине в интервале расстояний 30–100 м от бровки. Непрерывный ряд кирпичных гаражей-боксов постройки 1954 г. продолжает здание вплоть до обрыва к реке. Объект позволяет проследить деформацию грунтов основания от бровки коренного берега на расстояние около 100 м. Сквозные трещины обнаружены в стенах по всему периметру жилого здания с раскрытием от 0,2 до 50 мм. Они имеют вертикальное ориентирование, местами с уклоном до 45° в сторону от реки. Более значительные и частые трещины имеются в гаражах, расположенных ближе к обрыву. Произведен анализ деформационных процессов в стенах жилого здания и гаражей с течением времени в зависимости от удаления от бровки склона, результаты которого представлены на рисунке. Скорость горизонтального смещения, судя по раскрытию трещин, на первых метрах у обрыва составляет 2,14 мм/год (в среднем за 35 лет). С удалением от



Ширина раскрытия трещин (а) и скорость раскрытия трещин (б) в стенах здания на при- склоновом участке (Москва, ул. Косыгина, 6)

бровки она падает до 0,02 мм/год на расстоянии 30 м от склона (в среднем за 60 лет).

Другой пример проявления рассматриваемого процесса медленного горизонтального движения грунтов у борта долины дает киржачский Свято-Благовещенский монастырь — памятник федерального значения. Территория памятника расположена на левом берегу р. Киржач, на террасе, возвышающейся на 20 м. Русло реки в XIX в. расположено было иначе, чем сейчас. Согласно плану 1875 г., по всей северной границе территории памятника подмывалась рекой. В XX в. река сместилась к северу. Это случилось в силу естественного блуждания русла по пойме. Теперь боковая речная эрозия угрожает лишь западной части территории.

Высокая терраса р. Киржач в геологическом отношении представляется собой однородный грунтовый массив. Он сложен четвертичными и меловыми песками, которые у уреза реки подстилаются толщей юрских глин. В песках на глубине 8–10 м от поверхности террасы имеется двухметровый слой песчано-глинистого состава. Тонкодисперсные глинистые отложения в этом горизонте переслаиваются со шнурками пылеватых песков, что характерно для меловых отложений региона. На нем залегает маломощный водоносный горизонт верховодки.

На уровне реки в меловых песках залегает второй от поверхности горизонт грунтовых вод, гидравлически связанный с рекой. Следовательно, глинистые грунты в грунтовой толще под монастырем полностью насыщены водой.

Можно констатировать, что рельеф и геолого-гидрогеологическое строение склона способствуют образованию оползневых деформаций под территорией памятника, в пределах зон регулируемой застройки и охраняемого ландшафта. Здесь есть все три условия, необходимые для образования оползней: крутой склон, наличие в нем глинистых грунтов и обводнение подземными водами. В настоящее время деформации проявляются в двух видах. Во-первых, имеют место поверхностные процессы, выраженные мелкими оползнями и осовами, захватывающими склон на глубину порядка 1 м. Во-вторых, проявлены процессы глубинных медленных пластических деформаций, которые являются стадией подготовки крупных оползней. Относительно активно процесс пластических деформаций протекает в полосе 15 м от бровки склона (по деформациям старого архиерейского корпуса монастыря) и пассивно в полосе порядка 50–60 м (по деформациям церкви Всемилостивого Спаса).

В Спасском соборе по его продольной оси имеются трещины в апсиде и западной стене, а также в полу. Трещины не широкие, на полу трещина имеет ширину около 10 мм. В верхних частях стен ширина раскрытия трещины меньше, что свидетельствует о их связи с деформациями основания. Скорость расхождения северной и южной стен собора незначительна и составляет порядка 0,1 мм / год. В бутовом фундаменте собора на его оси под апсидой трещина более широкая, так как бутовый фундамент на столетия старше пола, который неоднократно обновлялся за многовековую историю храма. Разница в раскрытии трещин указывает на многовековой, незатухающий, но очень медленный процесс. Ширину раскрытия трещины в бутовой кладке трудно оценить. Мы наблюдали ее в разведочном шурфе.

В архиерейском корпусе того же монастыря, расположенному в 10–15 м от бровки откоса, трещины более значительны. Корпус построен в XIX в. на месте аналогичного здания. Оно было разобрано, вследствие сильных деформаций, исключивших его дальнейшую эксплуатацию. В настоящий момент южная стена корпуса, дальняя от реки, наклонена в сторону реки с отклонением от вертикали 3–4°. В восточной стене имеются трещины, параллельные борту долины, с суммарным раскрытием до 20 мм. Они свидетельствуют о расхождении северной и южной стен со скоростью до 1 мм / год. Это на порядок больше, чем в Спасском соборе.

В северной стене архиерейского корпуса, обращенной к реке, на штукатурном покрытии 2010 г. в июне 2012 г. видна тонкая горизонтальная трещина длиной в несколько метров. Следовательно, северная стена кроме горизонтального смещения к реке имеет вертикальную составляющую перемещения. Это логично, поскольку северная стена — ближняя к крутыму склону. Подобные трещины имеются в здании школы советского времени, расположенному западнее архиерейского корпуса на том же удалении от бровки склона.

Деформации рассматриваемого типа отсутствуют на Кремлевском холме в Москве. Превышение над рекой и крутизна уступа там соответствуют тому, что имеется на пл. Гагарина, но под Кремлем отсутствуют глинистые отложения мела и юры. Возможно в этом геологическая причина сохранения кремлевских зданий. В Троице-Сергиевой лавре крепостные стены на бровке коренного борта долины р. Кончуры имеют трещины, свидетельствующие о медленном горизонтальном движении грунтов в сторону долины. Трещины имеются и в корпусах Лавры, расположенных внутри крепостных стен.

**Выводы.** 1. Существует процесс медленного движения грунтов в сторону долины реки. На горизонтальных строительных площадках над уступом высоких террас и над бровкой коренного берега глубоких речных долин скорость достигает нескольких миллиметров в год. Она постепенно затухает от бровки в глубину склона. Процесс приводит к деформации зданий, расположенных близко к борту долины или уступу речной террасы. Деформация выражается образованием специфических вертикальных трещин растяжения в несущих конструкциях кирпичных зданий с раскрытием до десятков миллиметров. Например, скорость горизонтального движения у бровки может достигать 2,14 мм/год. По нашим немногочисленным наблюдениям, она снижается до 0,02 мм/год к расстоянию порядка 100 м от бровки долины и практически уже не нарушает конструкций.

В пятне здания, расположенного в интервале 5–30 м от обрывистой бровки на Воробьевых горах в Москве, разница скоростей в перемещении ближней к долине и дальней стены имеет порядок 1,2 мм/год. В г. Киржаче Владимирской области в здании, расположенном в 10–15 м от бровки долины, разница скоростей также имеет значение порядка 1 мм/год. Там же на расстоянии 60 м от бровки разница скоростей снижена до 0,1 мм/год.

Если одна стена опережает другую в своем движении к реке на 1 мм/год, то здание после нескольких десятилетий эксплуатации приходит в аварийное состояние, его ремонтируют, но, как это было в Киржаче и Москве, еще через несколько десятилетий сносят. На его месте возводят новое здание, которое вновь подвергается тем же растягивающим деформациям, поскольку строители не учитывают рассматриваемого нами процесса. При меньших скоростях, как показывает опыт использования зданий монастыря в Киржаче и жилых домов на пл. Гагарина в Москве, периодические капитальные ремонты позволяют благополучно эксплуатировать здания на протяжении десятилетий и столетий.

2. В пределах подвижной зоны скорость движения затухает неравномерно. Имеются зоны со всплесками повышенных деформационных скоростей, свидетельствующие о закладке поверхности смещения оползня. Аналогичные процессы описаны в работах [3, 4].

3. Опыт эксплуатации зданий показывает, что строительство в рассматриваемой подвижной зоне возможно на фундаментах, учитывающих описанный процесс, например, на плитном, работающем на растяжение, или при проведении специальных противооползневых мероприятий.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Очерки по геологии и инженерной геологии Московского столичного региона [Текст] / Под ред. Г.Л. Коффа, С.И. Петренко, Э.А. Лихачева, В.Ф. Котлова. — М. : РЭФИА, 1997. — 185 с.
2. Пашкин, Е.М. Инженерно-геологическая диагностика деформаций памятников архитектуры [Текст] / Е.М. Пашкин; ПИ «Геореконструкция». — СПб., 2013. — 334 с.
3. Петров, Н.Ф. Строение и механизм развития оползня на территории базы отдыха «Утес» на правом берегу р. Волги [Текст] / Н.Ф. Петров, Е.С. Васильев, Л.Ю. Григорьев // Инженерные изыскания. — 2011. — № 3. — С. 40–45.
4. Корхова, Ю.А. Древние и современные оползни Мамаева кургана [Текст] / Ю.А. Корхова // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Сер.: Естественные науки. — 2012. — № 4. — С. 81–84.

*ЧЕРНЫШЕВ Сергей Николаевич, д-р геол.-минерал. наук, проф.; E-mail: 9581148@list.ru  
Московский государственный строительный университет*

*ЕВГРАФОВА Ирина Михайловна, д-р техн. наук, доц.; E-mail: irina-sen811@yandex.ru  
Московский государственный строительный университет*

*НЕКЛЮДОВ Михаил Александрович, студ.*

*Московский государственный строительный университет*

Получено после доработки 21.07.14

**Chernyshev Sergey Nikolaevich**, doctor of geological and mineralogical sciences, professor; E-mail: 9581148@list.ru, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

**Evgrafova Irina Mihailovna**, doctor of technical sciences, assistant professor; E-mail: irina-sen811@yandex.ru, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

**Nekludov Mikhail Alexandrovich**, student, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

## **ON THE HORIZONTAL VELOCITY OF PLASTIC FLOW OF LOOSE SOIL AT THE SIDE OF THE RIVER VALLEY AS A CAUSE OF DEFORMATION AND FRACTURE STRUCTURES**

**(to the 125th anniversary since the birth of I.V. Popov)**

Speed of the slow plastic flow of soils on construction sites adjacent to the steep sides of the valley of the river has not been taken in the past and now is not taken into account in the master planning and design of subsequent buildings nearness indigenous side of the valley terraces and ledges. Purpose of the article — to draw attention to the existence of builders horizontal motion arrays grained soils near the deep natural and artificial incisions. The article describes the deformation of monuments, residential and non-residential buildings, located on the surfaces of high terraces and watershed plains near steep sides of river valleys and ravines. Deformation analyzes monuments Monastery in Kirzhach Vladimir region, the various buildings on the right bank Moscow. Set the order of magnitude of horizontal velocity and width of the zone of their manifestation.

**Key words:** plastic flow of soil, river valleys, the deformation of buildings, ground massifs, dispersed soils, landslides, foundations.

REFERENCES

1. Essays on geology and engineering geology of the Moscow metropolitan region [Text] / Ed. G.L. Koff, S.I. Petrenko, E.A. Lihachev, V.F. Kotlov. — M. : REFIA, 1997. — 185 p.
  2. Pashkin, E.M. Engineering geological deformations diagnosis monuments [Text] / E.M. Pashkin; PI «Georeconstruction». — Saint-Petersburg, 2013. — 334 p.
  3. Petrov, N.F. Structure and mechanism of landslide on the recreation center on the right bank of the Volga river [Text] / N.F. Petrov, E.S. Vasiliev, L.Yu. Grigoriev // Surveying. — 2011. — N 3. — P. 40-45.
  4. Korhova, Yu.A. Ancient and modern landslides Mamaev Kurgan [Text] / Yu.A. Korhova // News of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Ser. : Science. — 2012. — N 4. — P. 81-84.
-

# ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ<sup>1</sup>

1. К рукописи, представляемой в редакцию на русском языке, необходимо приложить:
  - *сопроводительное письмо* руководства организации, откуда исходит рукопись;

**к сопроводительному письму должна быть приложена гарантия оплаты публикации статьи<sup>2</sup> за подписью автора или руководителя представляющей статью организацией. Плата за публикацию статей аспирантов не взимается. Гарантийное письмо не требуется, если статья представляется организацией, осуществляющей целевые взносы на издание нашего журнала;**

— *рекомендацию* соответствующей кафедры вуза (заверенную выписку из протокола заседания кафедры);

— *экспертное заключение* о возможности опубликования, оформленное в организации, откуда исходит рукопись;

— *разрешение* Роспатента на открытую публикацию материалов по заявке на изобретение.

2. Рукопись должна готовиться на компьютере в программе Microsoft Word и представляться в редакцию распечатанной в двух экземплярах, с приложением ее записи на CD (3", 5").

Текст рукописи набирают шрифтом Times New Roman Сыг размером 14 пт. с межстрочным интервалом 1,5. Объем рукописи — до 10 страниц. Обязательна нумерация страниц.

3. Порядок оформления статьи (см. макет статьи на Internet-сайте журнала):

— индекс УДК;

— инициалы, фамилии авторов;

— название статьи;

— аннотация (объемом до 0,3 страницы текста);

— ключевые слова;

— текст статьи;

— библиографический список;

— сведения об авторах: *фамилии, имена, отчества (полностью), ученые степени, звания* (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать); наименование учреждений, в которых работают авторы, на русском и *английском языках*;

— почтовые адреса, телефоны и *e-mail* авторов;

— *название статьи на английском языке*;

— *аннотация на английском языке*;

— *ключевые слова на английском языке*;

— *библиографический список на английском языке*.

4. На полях рукописи указываются места рисунков и таблиц (вставлять их в текст не нужно — это делается при верстке).

Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).

5. Иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в программах CorelDraw или Microsoft Word, записанных с расширением \*.cdr (предпочтительно) или \*.doc, фотографий — TIFF или JPEG. Надписи и цифры набирать шрифтом Arial. Линии чертежа — не тоньше 1 пт. Иллюстрации, в том числе фотографии, должны быть черно-белыми с хорошей проработкой деталей.

Рисунки должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (внести изменения, исправления, т.е. изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки).

Иллюстрации должны быть распечатаны в двух экземплярах, с подписями к ним. Размер иллюстрации не должен превышать 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4.

6. Таблицы печатаются каждая на отдельном листе. Все наименования в них даются полностью, без сокращения слов.

7. Формулы следует набирать на компьютере шрифтом Times New Roman размером 14 пт. Русские и греческие буквы и индексы, а также цифры, аббревиатуры и стандартные функции (Re, cos и др.) набираются прямым шрифтом. Латинские буквы набирать курсивом. Во избежание смешения сходных изображений прописных и строчных букв (*V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др.), а также трудноразличимых букв и символов: *l*, *e* и *1* (цифра), *n* и *p*, *I* и *J* и т.п.) пояснения в необходимых случаях выполняются простым карандашом на полях. В статье должен быть необходимый минимум формул. Все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента).

<sup>1</sup> С дополнениями в соответствии с требованиями ВАК (выделены п/ж курсивом).

<sup>2</sup> На 2014 г. — из расчета 800 р. за 1 журнальную страницу.

(Окончание правил)

**8.** Следует применять физические величины, обозначения и единицы измерения в системе СИ(СИ).

**9.** В библиографический список включаются только те работы, которые опубликованы в печати, составленные в соответствии с ГОСТ 7.80–2000, ГОСТ 7.1–03.

Примеры оформления можно найти на Internet-сайте НГАСУ (Сибстрин) по адресу [www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru) и [www.izvuzstr.sibstrin.ru](http://www.izvuzstr.sibstrin.ru)

**10.** Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции. Материалы уже публиковавшихся работ к рассмотрению не принимаются.

**11.** Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению. При доработке статьи после рецензии на первой странице указываются ее редакционный номер, число, месяц, год и пометка «рукопись после доработки». Доработанную статью необходимо присыпать в двух экземплярах с приложением ее записи в электронном виде. К доработанной рукописи обязательно прикладывать ответы на все замечания рецензента. Датой поступления статьи считается получение редакцией ее окончательного текста.

**12.** Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются. Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения текста рукописей. *Корректура статей авторам не представляется.*

**13.** Гонорар за опубликованные статьи *не выплачивается*.

**14.** Рукописи, не удовлетворяющие изложенным требованиям, отправляются авторам на доработку, что замедляет срок их опубликования.

## ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА

на 2-е полугодие 2014 г.

НА НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗВЕСТИЯ  
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

# «СТРОИТЕЛЬСТВО»

Журнал имеет разделы

Строительные конструкции  
Теория инженерных сооружений  
Строительные материалы и изделия  
Экономика и организация строительства  
Автоматизация и технология строительного производства  
Гидротехническое строительство  
Санитарная техника

Строительство автомобильных дорог и мостов  
Строительные и дорожные машины  
Научные проблемы архитектуры и экологии  
Научно-методический В лабораториях вузов  
Внедрение научных достижений в производство  
Научная информация

Каталожная цена за 6 месяцев — 2700 р.

Цена отдельного номера — 450 р.

Подписка принимается с любого месяца без ограничения всеми агентствами  
Роспечати и отделениями связи. Индекс 70377.

ББК 38  
И 33  
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов  
СТРОИТЕЛЬСТВО**

**№ 8 (668) 2014**

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*  
Технический редактор *Н.М. Макаренко*  
Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*  
Корректор *Г.И. Шведкина*