

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

№ 1 (661)
Январь 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.
П.А. Дмитриев, 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 E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 24.01.14. Формат 70×108 $\frac{1}{16}$
Усл. печ. л. 10,33+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 5140

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

- Шутов В.А., Миренков В.Е., Полуэктов В.А.** Деформирование составных пластин 5
Коломоец А.А., Модин А.С. Устойчивость равновесных состояний цилиндрической оболочки при действии неравномерного внешнего давления 13

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

- Шахов С.А., Ключникова Н.С.** Геополимерные вяжущие: отличительные особенности и перспективы 18
Овчаренко Г.И., Михайленко А.А. Взаимосвязь прочности и фазового состава автоклавного известково-зольного камня. Часть II 26

Столбоушкин А.Ю., Бердов Г.И., Столбоушкина О.А., Злобин В.И.

- Влияние температуры обжига на формирование структуры керамических стеновых материалов из тонкодисперсных отходов обогащения железных руд 33

Синельникова Р.М., Кучеренко А.Г., Дюльдин на М.В., Макаров В.Г.

- Особенности формования стеклопластиковых футеровок 42

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА	
АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Герасимов В.В., Коробова О.А., Щепотин Г.К., Михальченко О.Ю. Эффективность системотехники организационно-технологических решений строительных объектов	49
ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО	
Дзюбенко Л.Ф., Кузнецова Ю.А., Соколова В.А., Топоров В.М. Многофакторный анализ состояния эксплуатируемых гидротехнических сооружений	56
САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА	
Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А. Эжекция воздуха при перегрузках сыпучих материалов в вертикальных каналах с ковшами. С о б щ е н и е 3. Обсуждение результатов исследований	66
Мансуров Р.Ш. Многофункциональное устройство обработки воздуха для систем обеспечения микроклимата	75
Самарин О.Д. Расчет удельных теплопотерь через точечные теплотехнические неоднородности при использовании актуализированной редакции СНиП 23-02	81
СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ	
Авдеев Ю.В., Кононов А.Д., Кононов А.А., Варданян Н.А. Сравнительный анализ фазовых методов определения координат в задачах дистанционного автоматического управления машинами дорожно-строительного комплекса	86
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	
Соколов В.А. Оценка технического состояния и физического износа строительных конструкций с использованием вероятностных методов технической диагностики ...	94
Серёгин С.В. О собственных крутильных колебаниях тонкостенных стержней открытого профиля	101
В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ	
Миряев Б.В., Толушов С.А. Экспериментально-теоретические исследования сжато-изгибаемых деревянных элементов купола в предельном состоянии	108
НАШИ ЮБИЛЯРЫ	
Известный ученый и педагог (к 75-летию Владимира Александровича Игнатьева)	117

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 1 (661)

January 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
P.A. Dmitriev, DSc (Eng), Prof.
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 E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

CONTENTS

THE THEORY OF ENGINEERING SRTUCTURES

- Shutov V.A., Mirenkov V.E., Poluektov V.A.** Deformation of multi-component plates 5
Kolomoets A.A., Modin A.S. The equilibrium states stability of a cylindrical shell under the non-uniform external pressure 13

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

- Shahov S.A., Kluchnikova N.S.** Geopolymer binders: distinctive features and prospects 18
Ovcharenko G.I., Mikhaylenko A.A. Relationship strength and phase composition of the autoclave lime-fly ash stone. Part II 26

- Stolboushkin A.Yu., Berdov G.I., Stolboushkina O.A., Zlobin V.I.** Firing temperature impact on structure forming in ceramic wall materials produced of fine dispersed iron ore enrichment wastes 33

- Sinelnikova R.M., Kucherenko A.G., Dyulidina M.V., Makarov V.G.** Features of formation glass reinforced plastics lining ... 42

ECONOMICS AND MANAGEMENT OF CONSTRUCTION

AUTOMATION AND CONSTRUCTION TECHNOLOGY

- Gerasimov V.V., Korobova O.A., Shchepotin G.K.,**

Mikhailchenko O.Yu. Efficiency of systems engineering organizational and technological solutions of construction of objects	49
HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION	
Dzjubenko L.F., Kuznetsova Yu.A., Sokolova V.A., Toporov V.M. Multivariate state analysis of the exploited hydrotechnical constructions	56
SANITARY ENGINEERING	
Logachev I.N., Logachev K.I., Averkova O.A. The ejection of air during overloads of granular materials in a vertical channels with ladles. Message 3. Discussion of research results	66
Mansurov R.S. Multifunctional device of air processing for microclimate system	75
Samarin O.D. Calculation of specific heat losses through point thermal non-uniformities using actualized edition of SNiP 23-02	81
BUILDING AND ROAD MACHINES	
Avdeev Yu.V., Kononov A.D., Kononov A.A., Vardanyan N.A. The comparative analysis of phase methods of a coordinates setting in problems of remote automatic control of machines of a road-building complex	86
SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION	
Sokolov V.A. Technical condition assessment and physical deterioration construction using probabilistic methods of technical diagnostics	94
Seregin S.V. About own tortional fluctuations of thin-walled cores of the open profile	101
IN HIGHER SCHOOL LABS	
Miryaev B.V., Tolushov S.A. Experimental and theoretical researchs of compressed flexural wooden elements of the dome at the extreme state	108
JUBILEE'S ARTICLES	
The known scientist and the teacher (to Vladimir Alexandrovich Ignatyev's 75 anniversary)	117

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 539.3

В.А. ШУТОВ, В.Е. МИРЕНКОВ, В.А. ПОЛУЭКТОВ

ДЕФОРМИРОВАНИЕ СОСТАВНЫХ ПЛАСТИН*

Рассматривается деформирование кусочно-однородных прямоугольных областей в условиях плоского напряженного состояния. Целью работы является создание теории расчета составных пластин. Теория строится на основе системы сингулярных интегральных уравнений, связывающих все граничные значения компонент напряжений и смещений. При этом возникает проблема формулировки обратных задач, когда необходимо оценить реальные напряжения на границах, упругие характеристики и координаты дефектов, что связано с практическими приложениями полученных результатов.

Ключевые слова: составные пластины, интегральные уравнения, напряжения, смещения, граничные условия, обратные задачи.

Теория расчета кусочно-однородных пластин в условиях плоской деформации находится в стадии развития. Граничные задачи являются многопараметрическими, и искомые решения могут иметь сложную от них зависимость. Влияние одних параметров на решение может быть значительным, в то время как других менее значимым. Характер зависимости решения граничной задачи для кусочно-однородной области от параметров может иметь большое разнообразие, которое становится известным после обращения граничной задачи [1–3]. Обращение граничной задачи и исследование поведения решения в зависимости от значений параметров, как правило, достигается численным методом. В случае сложных граничных задач встает много вопросов относительно точности решения, описания влияния параметров на решение для разных их значений при одновременном их изменении, что приводит к большим массивам значений. Исследования в основном ведутся численными методами конечного и граничного элементов. Такие подходы не дают возможности детально выявить общие свойства решений, ставить и решать смешанные задачи в таких областях, выделять особенности решений и получить их представления. Встречаются некорректно поставленные задачи, формулируемые в виде линейного операторного уравнения $A\sigma = u$, в которых решение на фоне гладкой части содержит разрывы, изломы, близкие пики и другие особенности. При наличии приближенного заданной части u_δ , $|u - u_\delta| \leq \delta$ и неограниченного обратного оператора A^{-1} это приводит к значительным трудностям при построении регуляризующих алгоритмов на основе вариационных методов, в частности метода Тихонова.

Контактные задачи сложны и существенно не линейны вследствие подвижности границ и наличия трения между контактирующими поверхностями.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-05-00133).

ностями. Более тонкие эффекты связаны с тем, что в области контакта могут быть проскальзывания в процессе нагружения, после чего разгрузка конструкций приводит к ситуации, отличной от имевшей место при нагружении. В областях проскальзывания теряется энергия и поэтому нагрузка и разгрузка не будут упругими, что приводит к неконтролируемому изменению сжимающего усилия, которое восстанавливается из решения обратных задач.

Повышение достоверности вычислительных методов, уменьшение неопределенностей, связанных с физическими и (или) геометрическими упрощениями (сопровождающими решения для кусочно-однородных пластин), обусловливают необходимость применения строгих методов верификации и валидации. Под верификацией понимается определение точности численного моделирования выбранной концептуальной модели, а валидация есть проверка того, насколько данная математическая модель и ее численная реализация согласуется с соответствующими экспериментальными данными.

Поэтому целью данной работы является создание теории расчета составных пластин. Основные задачи теории упругости рассматриваются раздельно и для каждого из них разрабатываются свои методы решения. При расчетах на прочность, жесткость и устойчивость необходимо знание напряженно-деформированного состояния. В настоящее время насчитывается более 30 видов расчетов на прочность, для обеспечения которых необходимо иметь все компоненты напряжений и смещений на границах, контактах, что обеспечивает контроль за возможностью начала разрушения. Теория строится на основе системы сингулярных интегральных уравнений, связывающих все граничные значения компонент напряжений и смещений [1].

$$f(t_0) + 2\mu g(t_0) = \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma} \frac{f(t) + 2\mu g(t)}{t - t_0} dt, \quad (1)$$

$$\kappa \overline{f(t_0)} - 2\mu \overline{g(t_0)} = \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma} \frac{\kappa \overline{f(t)} - 2\mu \overline{g(t)}}{t - t_0} dt - \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma} [f(t) + 2\mu g(t)] d \frac{\bar{t} - \bar{t}_0}{t - t_0},$$

где κ, μ — упругие характеристики материала;

$g = u + iv$; u, v — компоненты смещений в направлении осей x и y ;

$$f(t) = i \int_0^t (X_n + iY_n) ds, \quad (2)$$

X_n, Y_n — усилия на Γ в направлении осей x и y ;

$t \in \Gamma$; t_0 — аффикс точки границы: черта над функцией — комплексно сопряженное значение;

i — мнимая единица;

Γ — граница однородной части составных пластин.

Рассматривается процесс деформирования составных пластин, контролируемый граничными условиями. Расчетные схемы таких пластин представлены на рис. 1. Все величины, имеющие размерность длины, отнесены к характерной ширине, а размерность напряжений — к макси-

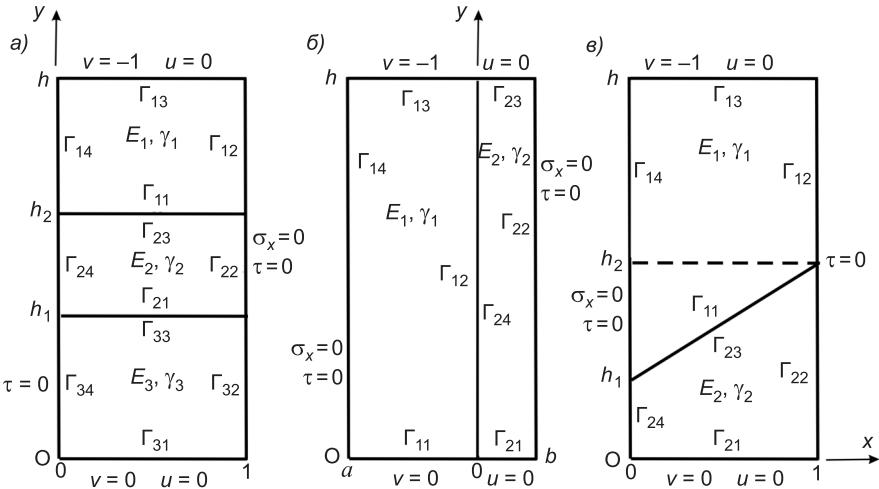


Рис. 1. Расчетные схемы пластин

а — горизонтальное расположение слоев, *б* — вертикальное расположение слоев, *в* — граница раздела слоев $y = (h_2 - h_1)x + h_1$

мальной величине напряжений на $y = h$. На боковых гранях пластин граничные условия примем в виде:

$$\sigma_x = 0, \tau = 0, x = 0; 1, 0 \leq y \leq h. \quad (3)$$

На торцах формулируются любые граничные условия в рамках всех трех основных задач теории упругости. В частности, на $y = h$ рассматривают три варианта граничных условий:

$$v = -1, u = 0; \text{ или } \sigma_y = -1, \tau = 0; \text{ или } v = -1, \tau = 0, \quad (4)$$

а на $y = 0$

$$u(x) = 0, v(x) = 0. \quad (5)$$

Предполагается, что на границах раздела свойств частей пластин имеет место сцепление

$$\sigma_n^+ = \sigma_n^-, \tau_n^+ = \tau_n^-, u_n^+ = u_n^-, v_n^+ = v_n^-, \quad (6)$$

т.е. непрерывность нормальных и касательных компонент напряжений и смещений, но при достижении касательными напряжениями некоторого предельного значения возможно учесть проскальзывание на этих участках.

На рис. 1, *а* представлена расчетная схема пластины с горизонтальными расположениями слоев. При расчетах рассматривались три случая различных модулей Юнга для частей составной пластины:

$$\begin{aligned} E_1 &= 3E_2, E_3 = 2E_1, E_2 = 10^4, \\ E_1 &= 3E_3, E_2 = 2E_3, E_3 = 10^4, \\ E_1 &= 2E_3, E_2 = 3E_3, E_3 = 10^4, \end{aligned} \quad (7)$$

которым соответствуют кривые 1, 2, 3 на рис. 2. Просчитывались ситуации, когда $Oh_1 = h_2h$, а величина $h_1h_2 = 0,1, 0,2, 0,5, 1,0, 2,0$, для $h = 6$, коэффициенты Пуассона $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 0,25$. В силу симметрии для получения дополнительной информации рассматривалась четверть пластины.

На всех гранях трех частей, составляющих пластину, рассчитывались нормальные и касательные напряжения и смещения. Деформирование контура пластины для $h_1 h_2 = 2$ приведено на рис. 2, а с учетом (7). Компоненты смещений представлены на рис. 2, б для $x = 1, 0 \leq y \leq 6$ и соответственно компонента смещений и мнимая часть (2), характеризующая напряжения $\sigma_x(y)$ для $x = 0, 0 \leq y \leq 6$ на рис. 2, в. Значения $\sigma_x(y)$ (для условий кривой 1), сжимающие в окрестности $y = 0$, плавно убывают до нуля при $y \approx 1,5$ и становятся растягивающими при $y = 2,5$, переходя скачком в сжимающие в пределах второго слоя и снова скачком переходя в растягивающие при $y \geq 3,5$, которые плавно убывают до нуля при $y \approx 4,5$ и переходят в сжимающие при $y \leq 6$. Значения $\sigma_x(y)$ (кривые 2 и 3) для $0 \leq y \leq 2,5$ сжимающие; для $2,5 \leq y \leq 3,5$ величина $\sigma_x(y)$ (кривая 3) положительна, а кривая 2 — растяжение переходит в сжатие; на участке $3,5 \leq y \leq 6$ значения $\sigma_x(y)$ отрицательны для кривой 3 и растягивающие для кривой 2, при $y = 3,5$, переходящие в сжимающие при $y \leq 6$.

Для случая $h_1 h_2 = 0,1$ качественно картина деформирования сохраняется, но для всех трех случаев в нижней части пластины $\sigma_x(y)$ сжимающие, а в верхней у всех трех кривых реализуется переход от растяжения в окрестности $y = 3,05$ к сжатию при $y \leq 6$. На участках $y = 0, h_1, h_2, h$,

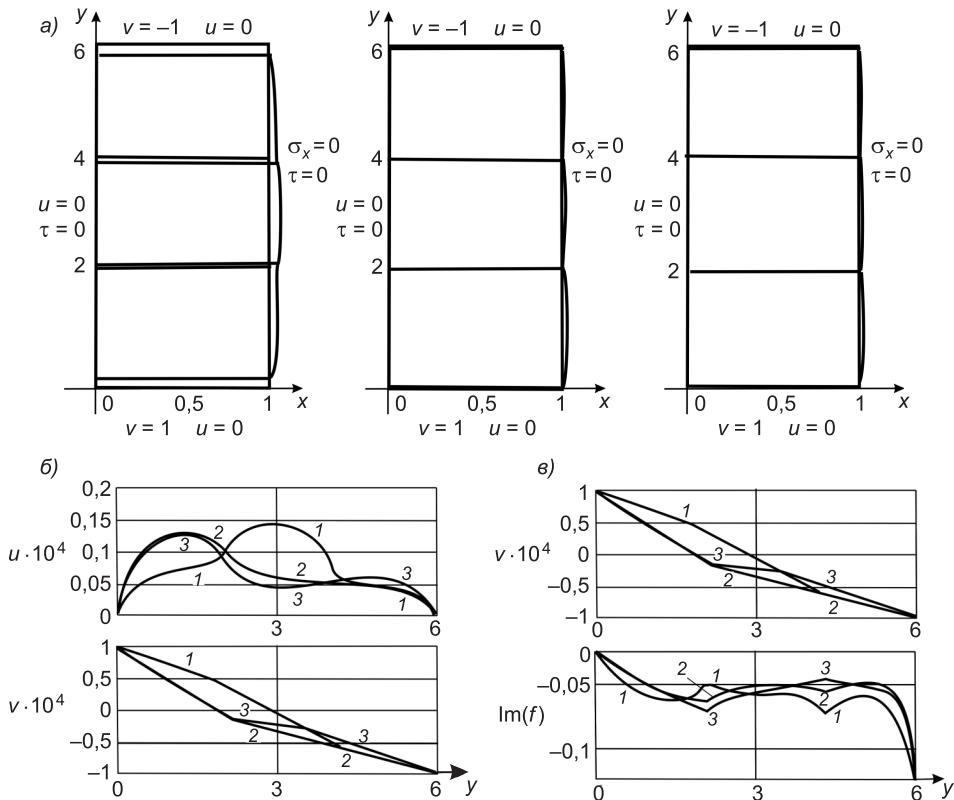


Рис. 2. Напряженно-деформированное состояние пластины

а — деформирование периметра, б — смещение граней $\Gamma_{11} + \Gamma_{21} + \Gamma_{32}$, в — смещения и мнимая часть (2) для $x = 0, 0 \leq y \leq 6$

$0 \leq x \leq 1$ напряжения $\sigma_y(x)$ сжимающие и практически постоянны. Наиболее существенное отличие наблюдается для касательных напряжений по всем сечениям $y = 0, h_1, h_2, h$, изменяясь как качественно, так и количественно, что в идеале позволяет управлять разрушением создаваемых таких конструкций, варьируя геометрию и модули Юнга.

На рис. 1, б приведена схема пластиинки, составленной из вертикальных частей. Все сказанное относительно рис. 1, а имеет место и в данном случае, т.е. выполняются условия (3)–(6). Расчеты проводились при $a = 1$ и $b = 1,0, 0,6, 0,4, 0,2$, которым соответствуют кривые 1–4 на рис. 3, принимая $h = 2$ и $E_2 = 3E_1$, $E_1 = 10^4$. На боковых гранях Γ_{22} и Γ_{14} (см. рис. 1, б) граничные условия сформулируем в виде (3), на $\Gamma_{13} + \Gamma_{23}$ — в виде (4), на $\Gamma_{11} + \Gamma_{21}$

$$v = 0, \quad \tau = 0, \quad (8)$$

на $\Gamma_{12} (\Gamma_{24})$ — условия (6). Рассчитывались нормальные и касательные напряжения и смещения на всех участках периметра пластины. На рис. 3 приведены результаты расчета компоненты смещений $u(x)$ и действительной, и мнимой частей функции напряжений (2). Компоненты смещений $u(x)$, представленные на рис. 3, а, практически совпадают для всех четырех рассматриваемых случаев на $y = 0, -a \leq x \leq b$. Действительная же часть (2) характеризует сжимающие нормальные напряжения $\sigma_y(x)$ на $y = 0, -a \leq x \leq b$, которые на каждом из участков Γ_{11} и Γ_{21} постоянны, равны по модулю, но скачком меняют значения при переходе через границу раздела свойств $\Gamma_{12} (\Gamma_{24})$. Как следует из рис. 3, а, наибольшие сжимающие напряжения $\sigma_y(x)$ возникают на Γ_{21} , границы части участка пластины с большим значением модуля Юнга. На рис. 3, б представлены результаты расчета действительной и мнимой частей (2) для $y = 2$, $-a \leq x \leq b$, характеризующих соответственно нормальные $\sigma_y(x)$ и касательные $\tau(x)$ напряжения. Сказанное о $\sigma_y(x)$ на $y = 0$ имеет место и при $y = 2$. Касательные напряжения $\tau(x)$ обращаются в ноль над частью пластины с большим модулем Юнга и непрерывны на $-a \leq x \leq b$.

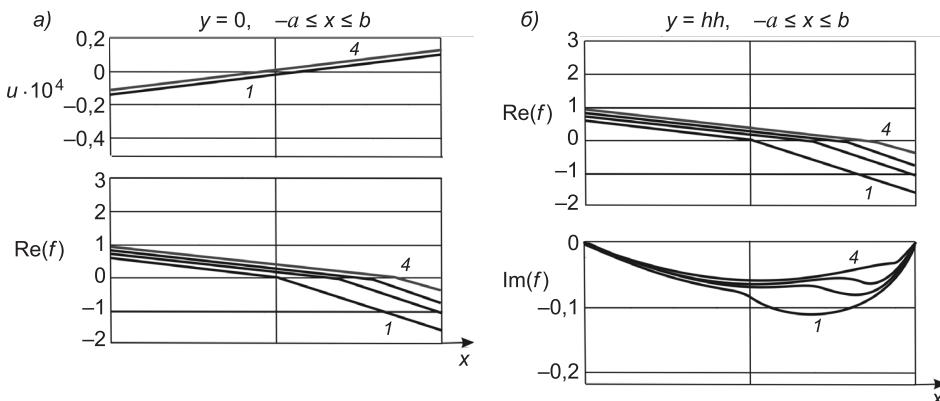


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние пластин
а — смещения и действительная часть (2) на $y = 0, -a \leq x \leq b$, б — действительные и мнимые части (2) на $y = h, -a \leq x \leq b$

Для случая пластины рис. 1, в граница раздела свойств задана уравнением

$$y = (h_2 - h_1)x + h_1.$$

На рис. 4, а представлены деформированные контуры пластин, приведенных на рис. 1, в, которые отличаются только величиной модулей Юнга:

$$E_1 = E_2, \quad E_1 = 3E_2, \quad 3E_1 = E_2. \quad (9)$$

Для измененных граничных условий только на Γ_{13} (см. рис. 1, в) в виде

$$v = -1, \quad \tau = 0,$$

по сравнению со случаем рис. 4, а, результаты деформирования представлены на рис. 4, б, принимая соответственно (9). Рис. 4 наглядно демонстрирует, с одной стороны, процесс деформирования таких составных пластин и снимает вопрос о возможности предсказания, как поведет себя конструкция и чем можно пренебречь при приближенном счете, а с другой — сильную зависимость решения от граничных условий при прочих равных предположениях.

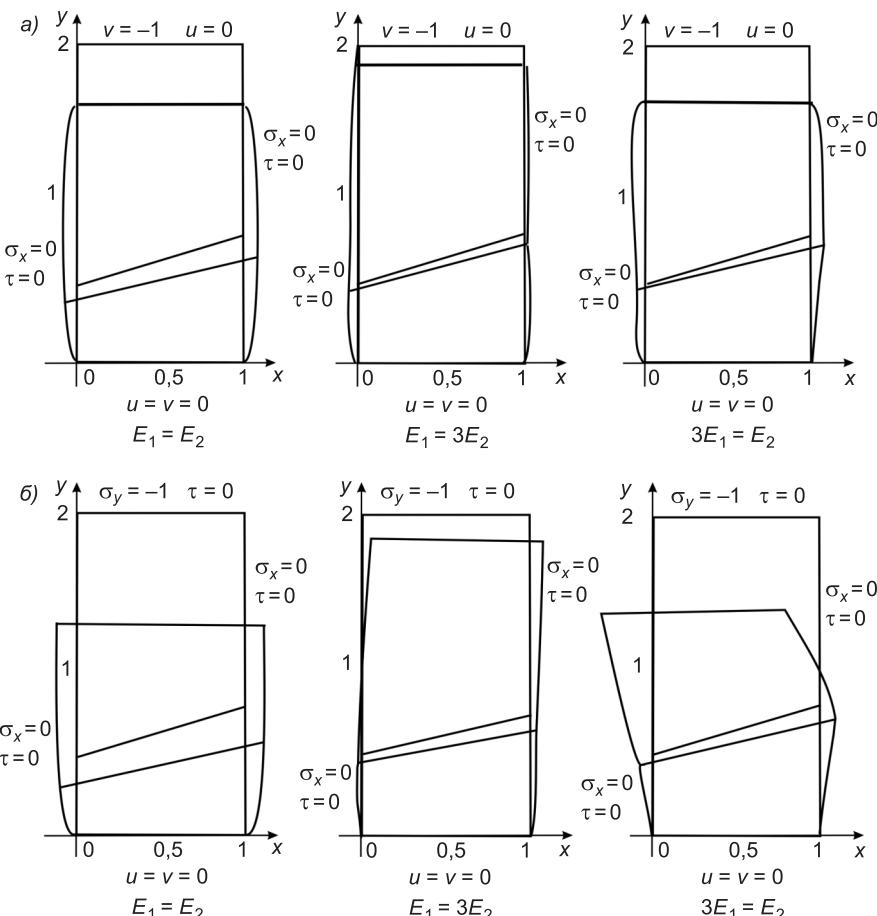


Рис. 4. Деформирование пластин под действием различных граничных условий

а — граничные условия первые из (4), б — граничные условия 2/3 из (4)

Одним из основных теоретических вопросов синтеза новых материалов с заданными свойствами является вопрос взаимосвязи «структура и строение — механические характеристики» исследуемой системы. Методы определения деформационных характеристик составных пластин, базирующиеся на испытаниях представленных образцов, зачастую оказываются неудовлетворительными в связи с существенным влиянием на результаты измерений условий закрепления, способа нагружения и технологических трудностей изготовления образцов. Поэтому достоверную информацию о свойствах пластин можно получить лишь на основе результатов испытаний таких пластин, что приводит к необходимости использования для этих целей методов идентификации, т.е. теории обратных задач. Правильными следует в общем случае признать только такие постановки обратных задач, при которых как граничные условия, механические характеристики и идентификация ослаблений, так и процесс накопления повреждений являются искомыми и одновременно определяемыми в процессе решения задачи. Предложенный метод определения деформирования составных пластин удобен тем, что с его помощью можно конструировать объекты любой геометрической сложности с одновременным учетом изменяющихся свойств сплошной среды. В то же время рассматриваются полученные решения частных задач (см. рис. 1–4) как первое приближение при реализации конкретных обратных задач [2, 3] теории упругости последовательными приближениями.

Таким образом, расчеты напряженно-деформированного состояния кусочно-однородных пластин показали его сложность и непредсказуемость, тем более аналогичные расчеты любыми известными численными методами неосуществимы. Главное это то, что полученные результаты необходимы как первое приближение при реализации нового метода решения обратных задач об одновременном восстановлении механических характеристик, геометрии границ раздела свойств и граничных условий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Миренков, В.Е. Математическое моделирование деформирования горных пород около ослаблений [Текст] / В.Е. Миренков, В.А. Шутов. — Новосибирск : Наука, 2009. — 176 с.
2. Миренков, В.Е. Восстановление физических характеристик кусочно-однородных пластин [Текст] / В.Е. Миренков, В.А. Шутов, В.А. Полуэктов // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 12. — С. 16–24.
3. Роганова, Н.А. Об идентификации механических свойств неоднородных материалов [Текст] / Н.А. Роганова, Г.З. Шарафутдинов // Изв. РАН. МТТ. — 2012. — № 4. — С. 96–107.

ШУТОВ Валерий Алексеевич, д-р техн. наук, проф.

*Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия
МИРЕНКОВ Валерий Егорович, д-р техн. наук, проф.*

*Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия
ПОЛУЭКТОВ Вячеслав Александрович, канд. техн. наук, доц.*

Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия

Shutov Valery Alexeevich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State Academy of Architecture and Fine Arts, Russia

Mirenkov Valery Egorovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State Academy of Architecture and Fine Arts, Russia

Poluektov Vyacheslav Alexandrovich, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State Academy of Architecture and Fine Arts, Russia

DEFORMATION OF MULTI-COMPONENT PLATES

Stresses and strains in piecewise homogeneous rectangular domains are considered in the case of plane stress. The goal of this work is to elaborate a theory for the numerical analysis of multi-component plates. The theory is based on a system of singular equations. This system relates all boundary values of components of stresses and displacements. At this stage, a quest for a formulation of an inverse problem appears. Here, it is required to estimate the actual stresses on the boundary, elastic properties, and coordinates of defects. These aspects are associated to the practical applications of the obtained results.

Key words: multi-component plates, integral equations, stresses, displacements, boundary conditions, inverse problems.

REFERENCES

1. Mirenkov, V.E. Matematical modeling of mining rock deformation near the weakening [Text] / V.E. Mirenkov, V.A. Shutov. — Novosibirsk : Science, 2009. — 176 p.
2. Mirenkov, V.E. Identification of properties, geometry and boundary conditions for piecewise-homogeneous plates [Text] / V.E. Mirenkov, V.A. Shutov, V.A. Poluektov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 12. — P. 16–24.
3. Roganova, N.A. Identification of mechanical properties non homogeneous material [Text] / N.A. Roganova, G.Z. Sharafutdinov // News RAN. MTT. — 2012. — N 4. — P. 96–107.

УДК 539.3

А.А. КОЛОМОЕЦ, А.С. МОДИН

УСТОЙЧИВОСТЬ РАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ДЕЙСТВИИ НЕРАВНОМЕРНОГО ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ

Нагруженная неравномерным внешним статическим давлением замкнутая цилиндрическая оболочка находится в некотором равновесном состоянии. Рассматривается движение оболочки при малых изменениях нагрузки. Для решения задачи использованы нелинейные дифференциальные уравнения статики и динамики теории пологих оболочек в смешанной форме кинематической модели Кирхгофа–Лява. Составными частями алгоритма численного решения задачи являются метод Бубнова в высших приближениях и метод Рунге–Кутты.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка, неравномерное внешнее давление, нелинейная постановка.

Исследованию устойчивости гибкой замкнутой цилиндрической оболочки при действии неравномерного внешнего давления посвящен ряд работ. В статической постановке эти задачи рассматривались, например, в работах [1–3] и др.

Исследованию динамической устойчивости посвящена работа [4], в которой рассматривается задача колебания оболочки при малых возмущениях, предварительно нагруженных статическим неравномерным внешним давлением.

Для решения задачи разработан алгоритм, составными частями которого являются метод Бубнова, Ньютона–Канторовича и Рунге–Кутты.

1. Постановка задачи. Рассмотрим замкнутую цилиндрическую оболочку кругового сечения, шарнирно закрепленную по торцам. Материал оболочки предполагается упругим. Предварительное нагружение оболочки осуществляется равномерным статическим внешним давлением, приложенным по площадке (рис. 1):

$$l/2 - \beta l \leq x \leq l/2 + \beta l, \quad -\alpha R \leq y \leq \alpha R.$$

Для построения графика функции $q(w)$ используем нелинейные дифференциальные уравнения статики теории пологих оболочек в смешанной форме кинематической модели Кирхгофа–Лява.

$$\begin{aligned} D\nabla^4 w &= L(w, \phi) + \nabla_k^2 \phi + q, \\ (1/Eh) \cdot \nabla^4 \phi &= -0,5L(w, w) - \nabla_k^2 w. \end{aligned} \tag{1.1}$$

Здесь

$$\begin{aligned} \nabla^4 &= \partial^4 / (\partial x^4) + 2\partial^4 / (\partial x^2 y^2) + \partial^4 / (\partial y^4), \quad \nabla_k^2 = K_y \cdot \partial^2 / (\partial x^2), \\ D &= Eh^3 / (12 \cdot (1 - v^2)), \end{aligned}$$

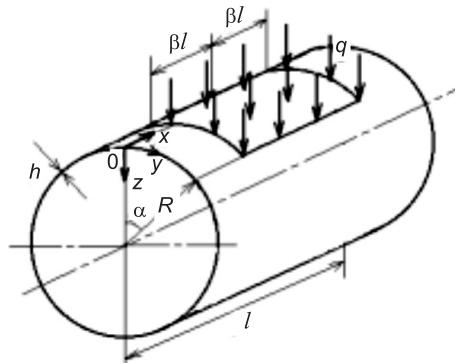


Рис. 1. Нагружение оболочки

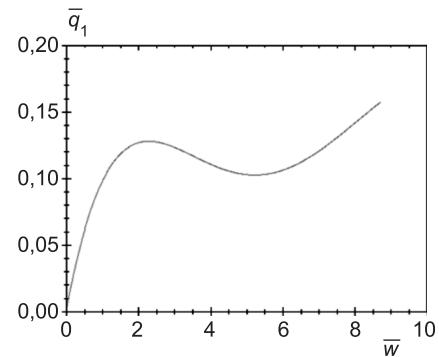


Рис. 2. Зависимость $\bar{w} - \bar{q}_1$

$$L(w, \phi) = (\partial^2 w / \partial x^2) \cdot (\partial^2 \phi / \partial y^2) - 2 \cdot (\partial^2 w / \partial x \partial y) \cdot (\partial^2 \phi / \partial x \partial y) + (\partial^2 \phi / \partial x^2) \cdot (\partial^2 w / \partial y^2),$$

$$L(w, w) = 2[(\partial^2 w / \partial x^2) \cdot (\partial^2 w / \partial y^2) - (\partial^2 w / \partial x \partial y)^2],$$

x, y — продольная и окружная координаты;

q — внешнее давление;

E и v модуль Юнга и коэффициент Пуассона;

w и ϕ — искомые функции прогиба и усилий;

$K_y = 1/R$ — кривизна оболочки.

Границные условия имеют вид:

$$w = 0, (\partial^2 w / \partial x^2) = 0, \phi = 0, (\partial^2 \phi / \partial x^2) = 0 \text{ при } x = 0 \text{ и } x = l. \quad (1.2)$$

Безразмерные параметры введены по формулам:

$$\begin{aligned} x &= l\bar{x}, y = R\bar{y}, w = h\bar{w}, \phi = Eh^3\bar{\phi}, \\ K_y &= \bar{K}_y h / R^2, \lambda = l / R, q = Eh^4 / (l^2 R^2) \bar{q}, \bar{q} = \bar{q}_1 K_y^2. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Площадка нагружения в безразмерном виде:

$$0.5 - \beta \leq \bar{x} \leq 0.5 + \beta, -\alpha \leq \bar{y} \leq \alpha. \quad (1.4)$$

Для исследования колебания оболочки при малых возмущениях нагрузки используем систему нелинейных дифференциальных уравнений теории пологих оболочек в смешанной форме:

$$\begin{aligned} D\nabla^4 w &= L(w, \phi) + \nabla_k^2 \phi + q - \gamma h / g((\partial^2 w / \partial t^2) + \varepsilon \cdot \partial w / \partial t), \\ (1/Eh) \cdot \nabla^4 \phi &= -0.5L(w, w) - \nabla_k^2 w. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Здесь γ — удельный вес материала;

g — ускорение силы тяжести;

t — время;

ε — коэффициент демпфирования среды.

Начальные условия имеют вид:

$$w = w_0, \phi = \phi_0, \partial w / \partial t = 0 \text{ при } t = 0, \quad (1.6)$$

w_0 и ϕ_0 получены в результате решения задачи (1.1), (1.2).

Границные условия имеют вид (1.2).

Дополнительно к (1.3) вводятся безразмерные параметры

$$t = (lR / h) \cdot (\gamma / Eg)^{1/2} \bar{t}, \quad \varepsilon = (h / lR) \cdot (Eg / \gamma)^{1/2} \bar{\varepsilon}. \quad (1.7)$$

2. Алгоритм расчета. Решение задачи (1.1), (1.2) ищется в виде

$$(\bar{w}, \bar{\phi}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^M (A_{ij}, B_{ij}) \sin(i\pi\bar{x}) \cos(j\bar{y}) \quad (2.1)$$

методом Бубнова в высших приближениях. После применения метода Бубнова получаем систему $2N(M + 1)$ нелинейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов A_{ij}, B_{ij} с параметром \bar{q}_1 . К этой системе добавлено уравнение

$$\bar{w} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^M A_{ij} \sin(i\pi\bar{x}_0) \cos(j\bar{y}_0), \quad (2.2)$$

где (\bar{x}_0, \bar{y}_0) — некоторая точка на поверхности оболочки.

Полученная система нелинейных алгебраических уравнений относительно неизвестных $A_{ij}, B_{ij}, \bar{q}_1$ с параметром \bar{w} решается методом Ньютона–Канторовича.

Нагрузки для предварительного нагружения берутся из зависимости прогиб–нагрузка (рис. 2).

Решение начально-краевой задачи (1.5), (1.6), (1.2) ищем в виде

$$(\bar{w}, \bar{\phi}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^M (A_{ij}(t), B_{ij}(t)) \sin(i\pi\bar{x}) \cos(j\bar{y}) \quad (2.3)$$

методом Бубнова в высших приближениях. После применения метода Бубнова получаем систему $N(M + 1)$ обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка и $N(M + 1)$ нелинейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов $A_{ij}(\bar{t}), B_{ij}(\bar{t})$. Коэффициенты $B_{ij}(\bar{t})$ аналитически выражаются через $A_{ij}(\bar{t})$. Полученная система обыкновенных дифференциальных уравнений относительно $A_{ij}(\bar{t})$ решается методом Рунге–Кутты.

3. Механические эффекты. Исследуем колебание оболочки после увеличения и уменьшения нагрузки на 1 %.

Результаты численных расчетов при $N = 4, M = 12, \alpha = 0,3, \beta = 0,2, \lambda = 1,5, \bar{\varepsilon} = 0$ приведены на рис. 3.

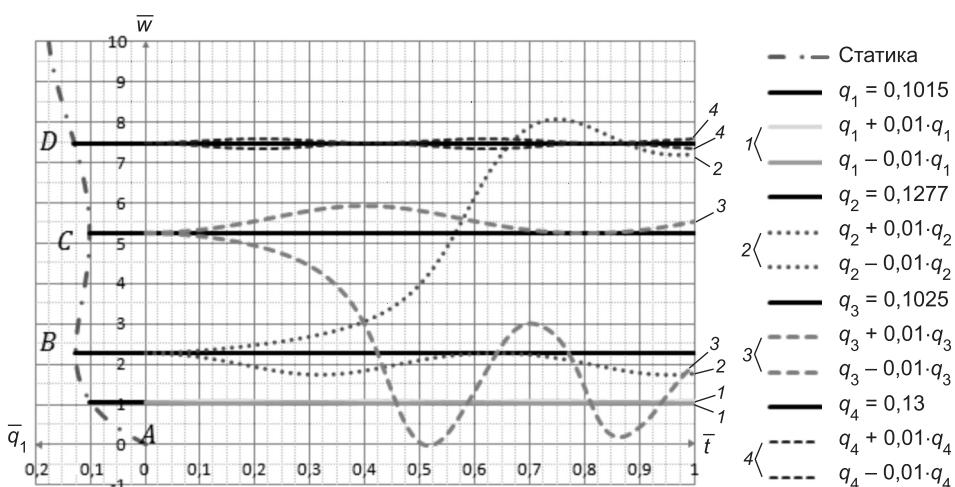


Рис. 3. Равновесные состояния оболочки

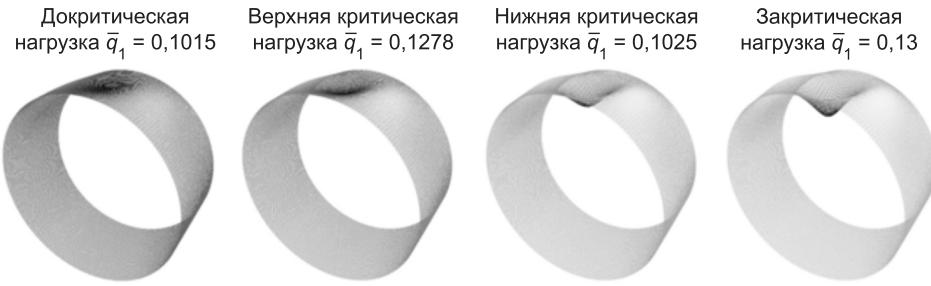


Рис. 4. Формы изгиба оболочки при различных нагрузках

На участке AB кривой $\bar{w} - \bar{q}_1$ численные расчеты проводились для $q_1 + 0,01q_1$ и $q_1 - 0,01q_1$. Колебание оболочки происходило в узкой полосе возле прогиба, полученного в результате решения задачи статики при q_1 .

При $\bar{q}_1 = q_2 + 0,01q_2$, где q_2 — верхняя критическая статическая нагрузка, происходит перескок на ветвь CD . Далее совершаются колебания с большими амплитудами возле прогиба, полученного в результате решения задачи статики, соответствующего точке D кривой $\bar{w} - \bar{q}_1$. При $\bar{q}_1 = q_2 - 0,01q_2$ колебания происходят в окрестности прогиба, соответствующего точке B на кривой $\bar{w} - \bar{q}_1$.

При $\bar{q}_1 = q_2 + 0,01q_2$ и $\bar{\varepsilon} = 10$ после перескока на ветвь CD происходят колебания возле прогиба, соответствующего точке D кривой $\bar{w} - \bar{q}_1$, которые затем затухают.

Точки на ветви BC соответствуют положению неустойчивого равновесия оболочки. При $\bar{q}_1 = q_3 - 0,01q_3$ происходит перескок на ветвь AB . Здесь q_3 — нижняя критическая статическая нагрузка.

На рис. 4 представлены формы изгиба оболочки при различных статических нагрузках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андреев, Л.В. Анализ поведения геометрически нелинейных цилиндрических оболочек при неосесимметричном нагружении [Текст] / Л.В. Андреев, Н.И. Ободан, А.Г. Лебедев // Изв. вузов. Машиностроение. — 1976. — № 5. — С. 5–7.
2. Кабанов, В.В. Устойчивость цилиндрической оболочки при неоднородном неосесимметричном нагружении [Текст] / В.В. Кабанов, В.Д. Михайлов // Прикл. механика. — 1980. — Т. 16, № 8. — С. 11–15.
3. Коломоец, А.А. Нелинейное деформирование и устойчивость замкнутой цилиндрической оболочки при произвольном внешнем давлении [Текст] / А.А. Коломоец, В.А. Крысько, А.Н. Куцемако // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1985. — № 2. — С. 32–36.
4. Коломоец, А.А. Динамическая и статическая устойчивость гибкой цилиндрической оболочки при неравномерном внешнем давлении [Текст] / А.А. Коломоец, А.Н. Куцемако // Проблемы машиностроения и автоматизации. — 1993. — № 1–2. — С. 49–53.

КОЛОМОЕЦ Анатолий Андреевич, канд. физ.-мат. наук, доц.; E-mail: kolomoetsaa@bk.ru

Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина

МОДИН Алексей Сергеевич, асп.; E-mail: almodin@mail.ru

Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина

Получено 18.11.13

Kolomoets Anatoly Andreevich, candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor; E-mail: kolomoetsaa@bk.ru, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia

Modin Alexey Sergeevich, post-graduate student; E-mail: almodin@mail.ru, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia

THE EQUILIBRIUM STATES STABILITY OF A CYLINDRICAL SHELL UNDER THE NON-UNIFORM EXTERNAL PRESSURE

The paper considers the movement of a cylindrical shell with load's small perturbations. A closed cylindrical shell under the non-uniform external pressure is in the equilibrium state. We have used the nonlinear equations referring Kirchhoff-Love's cinematic model of statics and dynamics flat shells theory in the mixed form to solve the specified problem. The algorithm involves the Bubnov method with higher approximations and the Runge-Kutta methods.

Key words: cylindrical shell, non-uniform external pressure, non-linear setting.

REFERENCES

1. Andreev, L.V. Analysis of geometrically nonlinear behavior of cylindrical shells under axisymmetrical loading [Text] / L.V. Andreev, N.I. Obodan, A.G. Lebedev // News of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering. — 1976. — N 5. — P. 5–7.
2. Kabanov, V.V. Stability of a cylindrical shell with a non-uniform axisymmetrical loading [Text] / V.V. Kabanov, V.D. Mihailov // Applied mechanics. — 1980. — Vol. 16, N 8. — P. 11–15.
3. Kolomoets, A.A. The nonlinear deformation and stability of a closed cylindrical shell with arbitrary external pressure [Text] / A.A. Kolomoets, V.A. Krysko, A.N. Kutsemako // News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture. — 1985. — N 2. — P. 32–36.
4. Kolomoets, A.A. Dynamic and static stability of a flexible cylindrical shell with nonuniform external pressure [Text] / A.A. Kolomoets, A.N. Kutsemako // Problems of Mechanical Engineering and Automation. — 1993. — N 1-2. — P. 49–53.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.51/.55.002.3

С.А. ШАХОВ, Н.С. КЛЮЧНИКОВА

ГЕОПОЛИМЕРНЫЕ ВЯЖУЩИЕ: ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Приведены основные сведения о geopolимерных вяжущих (геополимерах, вяжущих щелочной активации) и рассмотрены перспективы их дальнейшего развития в качестве общестроительных вяжущих материалов.

Ключевые слова: geopolимерные вяжущие, геополимеры, вяжущие щелочной активации, шлакощелочной цемент, металлургические шлаки.

В настоящее время портландцемент по сумме технико-экономических факторов — наличия во всем мире практически неограниченной сырьевой базы, освоенного технологического процесса и оборудования, соответствия необходимому уровню свойств и долговечности — является основным общестроительным вяжущим веществом. Однако производство портландцемента по обжиговой технологии достаточно энергоемкое и сопровождается большими выбросами CO_2 (6–8 % от массы сжигаемого топлива), что негативно влияет на экологическую ситуацию в мире. Поэтому создание безобжиговых вяжущих и строительных материалов на их основе для замещения энергоемкого портландцемента остается актуальной задачей для современного строительного материаловедения.

Судя по количеству ежегодно публикуемых научно-исследовательских работ, альтернативой портландцементу в перспективе могут стать вяжущие вещества щелочной активации, более известные в западной научно-технической литературе как geopolимерные вяжущие или геополимеры [1, 2]. Под вяжущими щелочной активации (геополимерами) принято подразумевать вяжущие системы на основе тонкодисперсных аморфных или кристаллических алюмосиликатных материалов, затворяемых растворами щелочей или солей, имеющими щелочную реакцию (обычно растворами гидроксидов, силикатов или алюминатов натрия и калия). Портландцементный камень и затвердевший геополимер имеют различный химический состав и принципиальным образом отличаются по структуре. Продукт гидратации портландского цемента — кальциево-силикатный гидрогель — имеет слоистую тоберморитоподобную структуру, формируемую листами из кальциево-кислородных октаэдров и цепочками из тетраэдров $[\text{SiO}_4]^{4-}$ и $[\text{AlO}_4]^{5-}$, тогда как геополимерный камень представляет собой каркасный алюмосиликат из тетраэдров SiO_4 и AlO_4 , имеющих общие вершины [3, 4].

Материалы, получаемые на основе вяжущих щелочной активации (геополимеров), обладают низкой проницаемостью и высоким показате-

лем рН поровой жидкости, обеспечивающей им хорошую устойчивость к агрессивным средам и перепадам температуры, что делает эти материалы пригодными для работы в неблагоприятных условиях. Начало работам в области вяжущих щелочной активации положил Пьюрдон в своем исследовании по влиянию растворов гидроксида натрия на техногенные алюмосиликатные материалы различного состава и морфологии¹. Развитие этого направления в бывшем СССР было связано, прежде всего, с работами В.Д. Глуховского², интенсивно проводимыми в 1960-е гг. Его усилиями были осуществлены серьезные попытки внедрения шлакощелочных вяжущих материалов в промышленность. Близкими по направлению исследованиями несколько позже стал заниматься Давидович во Франции³. Он существенно развил представления в этой области — расширил число потенциальных практических применений, подвел научную основу, обобщающую различные виды вяжущих щелочной активации под единым термином — геополимеры.

Свойства геополимеров (физико-механические и эксплуатационные) функционально связаны с составом и дисперсностью минеральной составляющей, природой и содержанием щелочного компонента, наличием добавок, особенностями структурообразования и другими факторами. В качестве минеральных составляющих для производства геополимеров используются алюмосиликатные материалы как естественного (горные породы), так и техногенного происхождения (шлаки, золы, микрокремнезем и другие отходы производства).

Использование горных пород и техногенных отходов в качестве активных компонентов в вяжущих композициях весьма перспективно, прежде всего, потому что могло бы стать оптимальным способом их утилизации. По химическому составу для производства геополимеров наиболее подходящими являются изверженные горные породы осадочного и магматического происхождения, содержащие в своем составе в необходимых соотношениях соединения кремния и алюминия^{4–6}. Эти горные породы традиционно делятся на глубинные (интрузивные) и излившиеся (эффузивные)⁷. Глубинные породы характеризуются химической стойкостью, высокой прочностью и твердостью. Типичными представителями интру-

¹ Purdon A.O. The action of alkalis on blast furnace slag // Journal of the Society of Chemical Industry. 1940. Vol. 59. September. P. 35–37.

² Глуховский В.Д., Пахомов В.А. Шлакощелочные цементы и бетоны. Киев: Будивельник, 1978. 184 с.

³ Davidovits J. Soft Mineralurgy and Geopolymers. In proceeding of Geopolymer 88 International Conference, the Université de Technologie, Compiègne, France. 1988. P. 49–56.

⁴ Калашников В.И., Ерошкина Н.А., Нестеров В.Ю. и др. Исследование активности магматических горных пород для производства геосинтетических вяжущих // Междунар. НТК «Новые энерго- и ресурсосберегающие научноемкие технологии в производстве строительных материалов». Пенза, 2005. С. 51–57.

⁵ Калашников В.И., Ерошкина Н.А., Нестеров В.Ю. и др. Влияние технологических параметров на свойства активизированных аплит-гранитных геосинтетических вяжущих // Сб. статей МНТК «Композиционные строительные материалы. Теория и практика». Пенза, 2006. С. 52–57.

⁶ Chandrasekhar S., Pramada P.N., Raghavan P. etc. Microsilica from rice husk as a possible substitute for condensed silica fume for high performance concrete // J. Mat. Sci. 2002. Vol. 21, N. 6. P. 1245–1247.

⁷ Ананьев В.П., Потапов А.Д. Основы геологии, минералогии и петрографии. 2 изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2005. 398 с.

зивных пород служат граниты, сиениты, габбро, диориты. Излившиеся породы образовались в результате более быстрого охлаждения магмы, излившейся в виде лавы на поверхность земли или близко к поверхности. Быстрое охлаждение препятствовало образованию крупных зерен, поэтому эти породы имеют скрытокристаллическую или аморфную структуру. Эффузивные горные породы с аморфной структурой более предпочтительны в качестве сырья для синтеза геополимеров, так как с точки зрения взаимодействия с щелочным раствором обладают большим потенциалом, чем их аналоги среди интрузивных пород.

Известные разработки геополимерных вяжущих с большой группой минеральных добавок разного состава показывают широкие возможности управления составом, структурой и свойствами геополимеров. Так, в Пензенском архитектурно-строительном университете под руководством В.И. Калашникова на основе различных горных пород — гранита, диопсида, дацита и др. — получены геополимерные вяжущие материалы, обладающие уникальными свойствами: прочность через 28 сут 70–100 МПа; небольшая усадка — менее 0,05 %; высокая кислотостойкость и огнестойкость, морозостойкость (потеря по массе < 0,1 %, потеря по прочности < 5 % после 180 циклов)^{4, 5, 8}.

Другой сырьевой источник для получения геополимеров — отходы промышленности и энергетики. Особенно привлекательным сырьем для получения эффективных видов геополимеров являются металлургические шлаки. Шлак представляет собой химически активную искусственную «породу», с большим содержанием аморфной фазы. Благодаря совместимости со многими минеральными добавками и способности к взаимодействию с разными щелочными компонентами, шлаки в геополимерах, как правило, выполняют роль реакционно-активного наполнителя. При подборе оптимальной концентрации шлака в геополимерах необходимо учитывать зависимость свойств последних от вида шлака и условий твердения^{2, 9}. Наилучшими активизаторами твердения шлака являются щелочи или жидкые стекла.

По химическому и фазовому составу к металлургическим шлакам близки золы ТЭС. Анализ известных работ по использованию зол при получении геополимеров показывает, что зора представляет собой минеральную добавку, которая повышает прочность цементного камня. Вследствие низкой основности золы рекомендуется размалывать до $S_{уд}$ 350–400 м²/кг и более^{10, 11}.

К веществам алюмосиликатного состава, пригодным для получения геополимеров, относятся природные и дегидратированные глины. Исследование влияния количества щелочного компонента на прочностные свойства

⁸ Хвастунов В.Л., Калашников В.И., Нестеров В.Ю. Использование местного сырья и отходов производства в изготовлении глиношлаковых строительных материалов // Современные проблемы строительного материаловедения: мат-лы междунар. конф. Казань, 1997.

⁹ Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Строительные материалы из отходов промышленности: учеб. пособие. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 368 с.

¹⁰ Макаренко С.В. Эффективные бетоны на основе золощелочных вяжущих с регулируемой структурой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2011. 20 с.

¹¹ Рябова А.Г. Щлакощелочные вяжущие и бетоны на основе зол, шлаков и золошлаковых смесей тепловых электростанций: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Киев, 1989. 17 с.

геополимеров показало, что по мере увеличения содержания щелочи в их составе до пределов, при которых соотношение $\text{Na}_2\text{O} : \text{Al}_2\text{O}_3 = 1 : 1$, вяжущая способность таких композиций повышается^{2, 12}. Установлено также, что наличие в обожженных глинистых материалах определенного количества стекловидной фазы, а в дегидратированных глинах аморфного кремнезема позволяет им более активно влиять на процессы структурообразования и формирования свойств композиционных геополимеров^{12–15}.

Из продуктов, не являющихся отходами производства, значительный интерес в качестве основы геополимеров у исследователей^{16–18} вызывает метакаолин ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), получаемый кальцинацией каолинита при 500–800 °C. В отличие от минеральных отходов и побочных продуктов промышленности, метакаолин разных производителей характеризуется стабильностью химического состава, морфологии и дисперсности частиц, и поэтому он часто используется в качестве модельной системы при изучении формирования геополимерного камня. На примере метакаолина последовательность процессов, приводящих к формированию геополимерного камня, выглядит следующим образом:

— обжиг каолинитовой глины приводит к разрушению и дегидратации глинистых минералов (образование метакаолина);

— разрушение структуры метакаолина щелочными активаторами, его частичное растворение;

— в щелочной среде происходит фрагментация алюмосиликатных компонентов с образованием алюминатных и низкополимерных силикатных анионов, из которых формируется трехмерный полимерный каркас (алюмосиликатный гидрогель). В его состав входят щелочные катионы, компенсирующие отрицательный заряд, создаваемый при встраивании тетраэдров AlO_4 между кремнекислородными тетраэдрами. Участие алюминия в образовании гетерополимерного каркаса создает дефицит положительного заряда, который компенсируется вхождением в структуру каркаса щелочных катионов.

Таким образом, щелочные катионы прочно удерживаются в структуре алюмосиликатного каркаса, благодаря чему материал в целом обладает высокой водостойкостью и устойчивостью к выщелачиванию. По всей видимости, растворение алюмосиликатных материалов и переход сили-

¹² Румына Г.В. Исследование влияния глинистых минералов на свойства шлакощелочных бетонов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев, 1974. 26 с.

¹³ Глуховский В.Д., Скурчинская Ж.В., Петренко И.Ю. О взаимодействии глинистых минералов с гидроокисью натрия // Наука і техніка в міському господарстві (Киев). 1973. Вип. XXIV. С. 176–179.

¹⁴ Жукова Р.С. Синтез и исследования щелочных алюмосиликатов на основе глинистых минералов и гидроксида калия: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев, 1973. 20 с.

¹⁵ Ростовская Г.С. Исследование грунтосиликатных бетонов на основе вяжущих, содержащих глинистые компоненты: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев, 1968. 20 с.

¹⁶ Глуховский В.Д., Петренко И.Ю., Румына Г.В., Скурчинская Ж.В., Машкина А.А. Гидротермальный синтез некоторых щелочных водных алюмосиликатов // Химия и химическая технология. Киев. Наук. думка, 1975. № 1. С. 132–136.

¹⁷ Weng L., Sagoe-Crentsil K. Dissolution processes, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis // J. Mater. Sci. 2007. Vol. 42. P. 2997–3006.

¹⁸ Panagiotopoulou Ch., Kontori E., Perraki Th., Kakali G. Dissolution of aluminosilicate minerals and by-products in alkaline media // J. Mater. Sci. 2007. Vol. 42. P. 2967–2973.

катных и алюминатных анионов в жидкую фазу является лимитирующей стадией в кинетике твердения геополимерных материалов. Поэтому чем активнее в этом отношении алюмосиликатный материал, тем выше скорость набора прочности. По сравнению с каолинитом, продукт его обжига — метакаолин — посыпает силикатные и алюминатные ионы в щелочной раствор значительно активнее; золы-унос и шлаки также уступают метакаолину в скорости растворения¹⁶. Добавка метакаолина к золе-уносу или шлаку заметным образом активизирует процесс щелочного твердения этих материалов. Микроструктура геополимера, полученного щелочной активацией метакаолина, представляет собой сплошной однородный гель, в то время как микроструктура геополимеров, образованных из шлаков и зол-уноса, отличается меньшей однородностью и представляет собой консолидированное цементным гелем вещество, не вступившее в реакцию¹³.

Ключевым условием для формирования цементного камня, обеспечивающим высокие физико-механические характеристики геополимеров, является содержание в них 5–15 % щелочных соединений. Стабильный рост прочности камня во времени объясняется постепенным связыванием щелочных соединений в продуктах взаимодействия. При нормальных условиях твердения^{19, 20} к 28 сут связывается примерно 20 % щелочи, к 180 — 45 %, к 360 сут — 72 %, к пяти годам — 90 %, к семи годам — 94 %. Прочность формируемого камня определяется составом геля, который, в свою очередь, зависит от природы щелочного активатора и твердого компонента, а также от параметров процесса твердения. Наилучшие результаты достигаются при использовании в качестве щелочных активаторов водных растворов силикатов и алюминатов щелочных металлов, уже содержащих низкополимерные силикатные анионы и обладающих вяжущими свойствами. Как установлено в исследованиях, выполненных в последнее время, не существует принципиальной разницы в механизме щелочного твердения алюмосиликатных материалов, отличающихся между собой составом и особенностями структуры [4]. Однако алюмосиликатные материалы, богатые кальцием (высококальциевые золы, шлаки), при щелочной активации наряду с щелочным алюмосиликатным гелем образуют также некоторое количество гидросиликатов кальция и кальциево-силикатного гидрогеля. Влияние этих веществ на формирование структуры камня и его механические свойства выяснено не до конца¹⁷. Как правило, из-за образования кальциево-силикатного геля структура геополимера, содержащего кальций, отличается меньшей однородностью по сравнению с камнем, в котором кальция нет.

В настоящее время достаточно отчетливо прослеживаются тенденции развития исследований геополимерных вяжущих и разработок материалов на их основе, направленных на производство их композиционных разновидностей с минеральными наполнителями. Так, результаты исследований, выполненных в Казанском государственном архитектурно-строительном уни-

¹⁹ Марин-Лопес С., Рейес Арайса Х.А., Мансано-Рамирес А. и др. Получение и свойства бетона на основе геополимера метакаолина // Неорганические материалы. 2009. Т. 45, № 12. С. 1528–1531.

²⁰ Khale D., Chaudhary R. Mechanism of geopolymmerization and factors influencing its development // J. Mater. Sci. 2007. Vol. 42. P. 729–746.

верситете, показали эффективность модификации шлакощелочных вяжущих отходами керамического кирпича, золой-уноса ТЭС, микрокремнеземом с получением нормально-, быстро- и особо быстротвердеющих вяжущих. В зависимости от вида щелочного затворителя стоимость вновь разработанных вяжущих ниже стоимости портландцемента²¹ на значение от 30 до 300 %. На основе этих вяжущих разработаны составы и технология производства бетонов классов по прочности^{21, 22} до В80, марок по морозостойкости до F800 и по водонепроницаемости до W25.

Свойства геополимеров на разных стадиях твердения могут быть изменены путем управления удельной поверхностью и гранулометрическим составом минеральной составляющей и режимом ТВО. Температура значительно ускоряет процесс растворения исходного алюмосиликатного каркаса и тем самым оказывает важное влияние на твердение геополимерных композиций, особенно в начальный период реакции. В частности, при воздействии малых добавок щелочи NaOH при температуре до 150 °C ускоряются процессы растворения шлака и минеральных наполнителей, а при увеличении температуры обработки до 330 °C, при которой появляется расплав безводной щелочи NaOH, и процессы синтеза цементирующей связки²³.

Технологические аспекты приготовления бетонов на основе вяжущих щелочной активации и их строительно-технические свойства в основном аналогичны технологиям и свойствам бетонов на основе портландцемента, хотя при синтезе геополимерных бетонов, как правило, всегда требуется термическая активация. Так, выдерживание свежеприготовленного изделия при 70–90 °C в течение от нескольких часов до 1 сут позволяет достичь практически конечной прочности^{2, 24, 25} — 60–70 МПа.

При получении изделий из геополимеров наряду с традиционным гидратным твердением используется и метод «контактного твердения». Последний основан на способности дисперсных силикатных и алюмосиликатных веществ, находящихся в аморфном состоянии, образовывать прочный водостойкий материал в момент сближения частиц при уплотнении. В настоящее время с использованием технологии контактного твердения удалось разработать большую группу высоконаполненных минерально-шлаковых вяжущих^{5, 26} с содержанием щелочного активатора не более 2–3 %.

²¹ Кривенко П.В. Синтез вяжущих с заданными свойствами в системе $\text{Me}_2\text{O}-\text{MeO}-\text{Me}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Киев, 1986. 40 с.

²² Кривенко П.В. Закономерности формирования структуры и свойств цементного камня шлакощелочных вяжущих // Сб. докл. II Всесоюз. науч.-практ. конф. Киев, 1984. С. 10–16.

²³ Рахимов Р.З., Хабибуллина Н.Р., Соколов А.А., Гатауллин Р.Ф., Рахимов М.М., Конохова Т.П. Композиционные шлакощелочные вяжущие // Строительные материалы. 2005. № 5. С. 30–32.

²⁴ Рахимова Н.Р. Композиционные шлакощелочные вяжущие, растворы и бетоны на их основе // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. 2008. № 4(12). С. 110–118.

²⁵ Van Deventer J.S.J., Provis J.L., Duxon P. etc. Characterization of geopolymer cements and concretes: structure/property relations and commercial utilization // 12th Int. Congress on the Chem. of Cement. 2007. Montreal. Paper No. T3–08.4.

²⁶ Сватовская Л.Б., Сычев М.М. Активированное твердение цементов. Л.: Стройиздат, 1983. 160 с.

Проведенный анализ публикаций по геополимерной тематике свидетельствует, что большинство работ отражает в основном результаты исследований в области физико-химических основ получения вяжущих веществ щелочной активации. Следует отметить ограниченное число публикаций, связанных как с разработкой реальных технологических переделов производства таких вяжущих, так и с экономической оценкой перспектив производства геополимеров. Вяжущие щелочной активации пока еще не приобрели ни в России, ни за рубежом широкого распространения, сравнимого по масштабам с распространением портландцемента. Среди причин, по которым геополимеры до сих пор не получили широкого применения, указывается недостаточная их изученность, отсутствие нормативной документации, регламентирующей обращение с ними, необходимость термического воздействия для активации процесса твердения геополимеров. Также не последнее значение имеет широкий диапазон сырьевых материалов по химическому и фазовому составу. Не определена ожидаемая оптимальная область применения таких вяжущих, вытекающая из характеристики их состава и свойств. Кажущаяся, на первый взгляд, простой и малозатратной технология геополимеров при ее практической реализации может оказаться неконкурентоспособной по отношению к технологии портландцемента вследствие высокой стоимости кондиционирования исходного сырья, высокой стоимости щелочного затворителя, технологического неудобства использования на практике двухупаковочной смеси (порошок и жидкость затворения). Тем не менее в ближайшей перспективе одновременно с дальнейшим совершенствованием технологии портландцемента следует ожидать и возрастания роли геополимеров, возможная экономическая и экологическая целесообразность применения которых будет служить стимулом для их исследования и полноценного промышленного внедрения. Однако геополимерные вяжущие могут стать альтернативой портландцементу лишь после того, как будут преодолены трудности технического характера, связанные с их производством.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Davidovitz, J. Geopolymer. Chemistry and applications [Текст] / J. Davidovitz. — Saint-Quentin : Institute Geopolymer, 2008. — 592 р.
2. Sialite technology — sustainable alternative to Portland cement // H. Sun, R. Jain, K. Nguyen, J. Zuckerman / Clean Techn. Environ. Policy. DOI 10.1007/s10098-009-0258-8. Published online 29 Sept 2009 (www. springerlink. com).
3. Duxson, P. Geopolymer technology: the current state of the art [Текст] / P. Duxson, A. Fernandez-Jimenez, J.L. Provis и др. // J. Mater. Sci. — 2007. — Vol. 42. — P. 2917–2933.
4. Lecomte, I. Micro-structural comparison between geopolymers, alkaliactivated slag cement and Portland cement [Текст] / I. Lecomte, C. Henrist, M. Liegeois и др. // J. Eur. Cer. Soc. — 2006. — Vol. 26. — P. 789–797.

*ШАХОВ Сергей Александрович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: sashakhov@mail.ru
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск
КЛЮЧНИКОВА Наталья Сергеевна, асп.; E-mail: Natarius2020@yandex.ru
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск*

Получено после доработки 18.11.13

Shahov Sergey Alexandrovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: sashakhov@mail.ru, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia
Kluchnikova Natalia Sergeevna, post-graduate student, E-mail: Natarius2020-@yandex.ru, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

GEOPOLYMER BINDERS: DISTINCTIVE FEATURES AND PROSPECTS

The work contains the basic information about geopolymers and discussed prospects of its further development as a civil binding materials.

Key words: geopolymers, geopolymers, alkali activated binders, alkaliactivated slag cement, metallurgical slag.

REFERENCES

1. Davidovitz, J. Geopolymer. Chemistry and applications [Text] / J. Davidovitz. — Saint-Quentin : Institute Geopolymer, 2008. — 592 p.
 2. Sialite technology — sustainable alternative to Portland cement // H. Sun, R. Jain, K. Nguyen, J. Zuckerman / Clean Techn. Environ. Policy. DOI 10.1007/s10098-009-0258-8. Published online 29 Sept 2009 (www. springerlink. com).
 3. Duxson, P. Geopolymer technology: the current state of the art [Text] / P. Duxson, A. Fernandez-Jimenez, J.L. Provis etc. // J. Mater. Sci. — 2007. — Vol. 42. — P. 2917–2933.
 4. Lecomte, I. Micro-structural comparison between geopolymers, alkaliactivated slag cement and Portland cement [Text] / I. Lecomte, C. Henrist, M. Liegeois etc. // J. Eur. Cer. Soc. — 2006. — Vol. 26. — P. 789–3797.
-

УДК 691.33:666.965.2:539.4

Г.И. ОВЧАРЕНКО, А.А. МИХАЙЛЕНКО

**ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРОЧНОСТИ И ФАЗОВОГО СОСТАВА
АВТОКЛАВНОГО ИЗВЕСТКОВО-ЗОЛЬНОГО КАМНЯ.
Часть II**

Прочность камня из известково-зольной и известково-зольно-кварцевой композиций с основностью 1,5 после автоклавирования в течение 10, 50, 100 и 150 ч изотермы при 1,0 МПа всегда прямо пропорциональна количеству гелевидной фазы C-A-S-H и обратно пропорциональна содержанию альфа-гидрата C_2S и тоберморита.

Ключевые слова: известково-зольные, известково-зольно-кварцевые композиции, автоклавная обработка, прочность камня, связь с фазовым составом.

В работах [1, 2] нами были показаны особенности фазового состава, прочности и их взаимосвязи для известково-зольного автоклавированного камня с содержанием извести в 20 %, а также в присутствии активизатора твердения Na_2SO_4 . Главный вывод из этих работ заключается в том, что прочность автоклавного материала зависит не от содержания тоберморита, а от количества гелевидной фазы C-A-S-H в камне. Содержание кристаллического алюминийзамещенного тоберморита может изменяться пропорционально прочности камня, а может и совершенно не соответствовать ей, в то время как количество C-A-S-H фазы всегда соответствует прочности.

Выявленную закономерность для низкоосновных составов требовалось проверить для высокоосновных систем. Известно, что повышение основности автоклавированных известково-кварцевых материалов приводит к синтезу $C_2SH(A)$ или альфа-гидрата C_2S по классификации X. Тейлора. Последнее влечет за собой образование рыхлой, высокопористой структуры и снижение прочности камня.

Целью настоящей работы является установление взаимосвязи между фазовым составом и прочностью известково-зольного, а также известково-зольно-кварцевого прессованного автоклавированного камня из смесей с повышенной основностью.

В эксперименте использовали прокаленную при 800 °C до полного удаления коксовых остатков золошлаковую смесь Барнаульской ТЭЦ-2 от сжигания кузнецкого каменного угля марки СС.

Кальциевая известь содержала 95,63 % активных CaO и MgO и по основным показателям соответствовала извести первого сорта по ГОСТ 9179-77. Отмытый кварцевый песок содержал 98 % SiO_2 и имел модуль крупности $M_k = 0,65$.

Смесь извести и ЗШО размалывали в шаровой мельнице с затратами энергии на помол в 50 % от затрат на помол клинкера на цемент. Удельная поверхность молотых композиций, определенная методом воздухопроницаемости на приборе ПСХ-2, составила около 240 m^2/kg . Контрольная силикат-

ная смесь из извести и молотого кварцевого песка, а также смеси на основе извести, ЗШО и песка приготавливались из отмытого кварцевого песка. Песок предварительно мололся с затратами энергии в 100 %, а затем в смеси с известью или в смесях извести, ЗШО и молотый песок — еще раз при 50 % затрат энергии. Удельная поверхность этих смесей по ПСХ-2 находилась в пределах 230–250 м²/кг. Методика эксперимента и дополнительная характеристика сырьевых материалов даны нами в [1].

В настоящем эксперименте было выбрано соотношение между известью и золошлаками как 1 : 1. Однако основность системы по коэффициенту основности П.И. Боженова составила $K_{\text{осн}} = 1,50$, т.е. была значительно выше 1. Химический состав смеси приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав смеси из извести и золошлаков

Наименование материала	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Сумма
Смесь 50 % извести и 50 % ЗШО	31,60	12,75	3,06	51,84	0,51	0,26	100,02

Помимо крайних составов только на ЗШО или только на молотом кварцевом песке составлялись смеси, в которых кислые компоненты заменялись один другим через 25 %. Образцы автоклавировались при 10, 50, 100 и 150 ч выдержки при 1,0 МПа.

На рис. 1 приведена результирующая взаимосвязь прочности камня, состава сырьевой смеси и продолжительности автоклавной обработки.

Как видно, прочности смесей пропорциональны прочностям крайних составов, а прочности каждого состава закономерно убывают с увеличением продолжительности автоклавирования. То есть в данном случае мы наблюдаем совершенно противоположную зависимость в сравнении с составами с 20 % извести в таких смесях [1]. Этот факт обычно объясняется

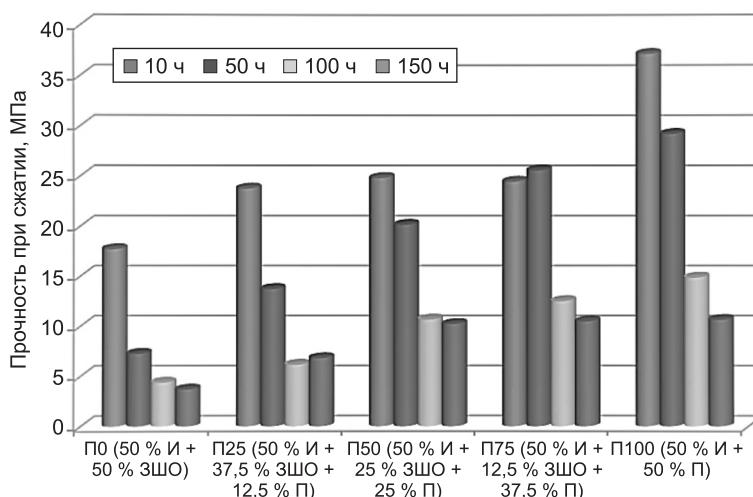


Рис. 1. Зависимость прочности камня от его состава и продолжительности автоклавной обработки при 1,0 МПа

П0 — 0 % кварцевого песка; П100 — 100 % молотого кварцевого песка и т.д.

синтезом альфа-гидрата C_2S или $C_2SH(A)$ (вместо тоберморита), который образует рыхлую (пористую) структуру камня. Однако не понятно, имеются ли в таких системах тоберморит и гель $C-A-S-H$ фазы и какие имеются взаимосвязи в фазовом составе, в том числе и с прочностью камня.

Для выяснения этих вопросов, как и в случае с низким содержанием извести [1], использовали комплексный термический анализ. Здесь также следует отметить малоинформационные данные DTA и необходимость интерпретировать результаты по данным DTG. Примеры термограмм даны на рис. 2 и 3.

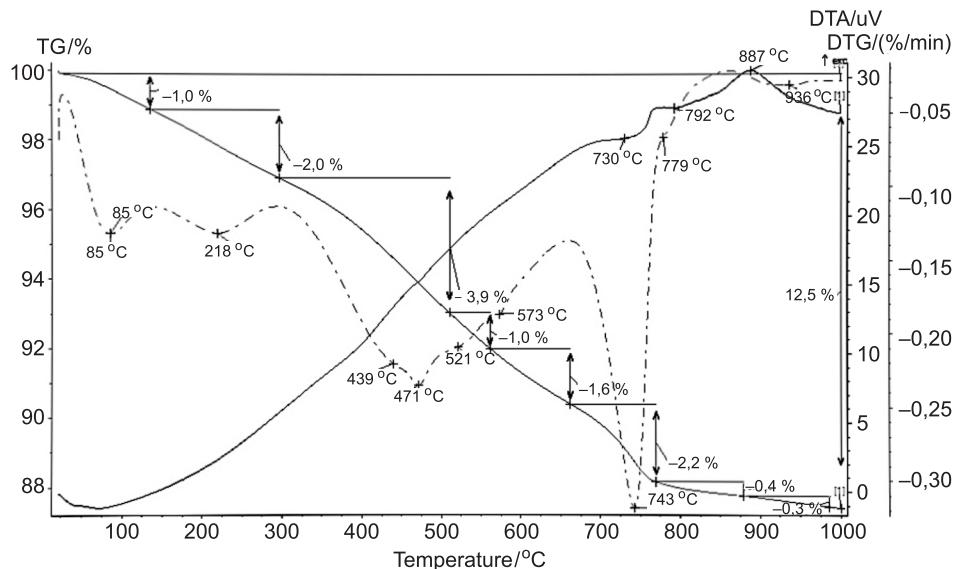


Рис. 2. Термограмма молотого состава — 50 % извести + 50 % ЗШО, автоклавированного 150 ч при 1,0 МПа

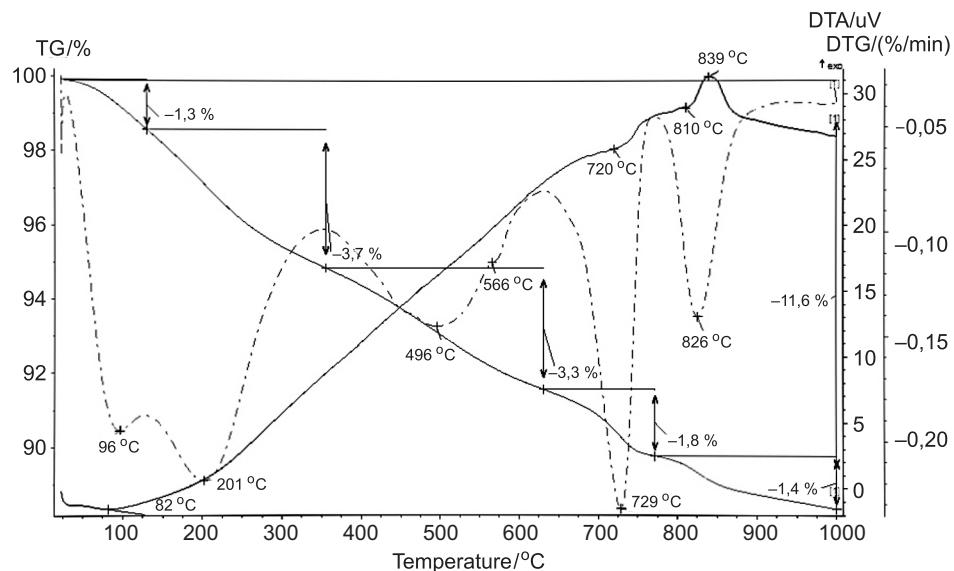


Рис. 3. Термограмма состава — 50 % извести и 50 % тонкомолотого кварца, автоклавированного 150 ч при 1,0 МПа

Как видно из рис. 2, на дифференциальной кривой потери массы (DTG) образца из молотой смеси 50 % извести и 50 % прокаленных ЗШО, автоклавированной 150 ч при 1,0 МПа, наблюдается потеря адсорбционной воды при 85 °C, воды алюминийзамещенным тоберморитом при 218 °C, основные эффекты дегидратации $C_2SH(A)$ при 439, 471, 521 и при 900–936 °C. Далее наблюдается основной эффект потери воды при разложении С–А–С–Н фазы при 743 °C. На термограммах с 10 ч запаривания имеется потеря массы свободной извести при 480–490 °C, которая вычиталась из потери массы $C_2SH(A)$ в диапазоне температур 300–600 °C. Потеря массы тоберморита бралась на DTG в районе 200 °C, а С–А–С–Н геля — на эффекте около 720–740 °C. На кривой потери массы известково-кварцевой композиции при длительном автоклавировании дополнительно появляется эффект потери массы при 826 °C, отнесенный нами к ксонотлиту. Его количество не учитывалось, так как в известково-зольных композициях он отсутствовал. Результаты обработки термограмм приведены в табл. 2.

Таблица 2. Прочность камня и потери массы основных его фаз

Прочность, МПа	Состав	Изотерма запаривания, ч	Потеря массы при 200 °C, %	Потеря массы при 730 °C, %	Потеря массы при 300–600 °C, %
17,7	П0	10	0,5	3,9	2,1
3,7	П0	150	2,0	2,2	5,5
37,2	П100	10	0,5	3,1	2,2
10,6	П100	150	3,7	1,8	3,5
24,5	П75	10	0,5	2,7	2,2
10,5	П75	150	3,4	1,6	3,9

Примечание. П100 — 100 % молотого кварцевого песка в смеси, П0 — 0 % песка, П75 — 75 % песка в смеси.

По данным табл. 2 построены графики изменения содержания основных фаз при запаривании известково-зольно-кварцевых композиций (рис. 4–6).

Из рис. 4 видно, что при коротких режимах запаривания в 10 ч преобладающей фазой в камне является гель С–А–С–Н. Тоберморит здесь играет подчиненную роль, а количество альфа-гидрата C_2S составляет 50–80 % от геля С–А–С–Н. Но если к альфа-гидрату C_2S добавить свободную известь, то их суммарное содержание превысит каждую из других фаз (суммарная потеря массы $Ca(OH)_2$ и $C_2SH(A)$ около 6 %). При увеличении времени запаривания до 150 ч портландит исчезает, количество альфа-гидрата C_2S значительно увеличивается и в золосодержащих системах превышает содержание других фаз. Только в беззольной кварцевой смеси тоберморит превышает содержание $C_2SH(A)$. Это обусловлено тем, что при массовом соотношении извести и кварцевого песка 1:1 основность смеси составляет всего лишь 1,07, в то время как известково-зольная композиция при таком же массовом соотношении компонентов имеет основность 1,5. Во всех смесях количество гелевидной С–А–С–Н фазы уменьшается пропорционально времени автоклавирования.

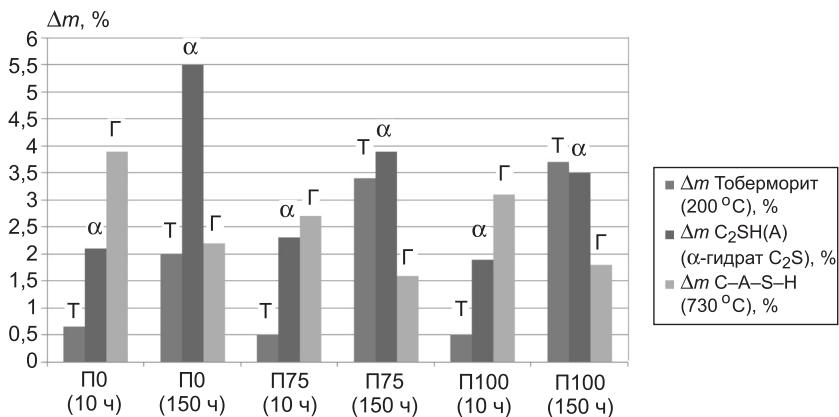


Рис. 4. Зависимость фазового состава камня от продолжительности запаривания и состава смеси

Т — тоберморит; α — α -гидрат C_2S ; Г — гель C-A-S-H. Обозначение составов по рис. 1

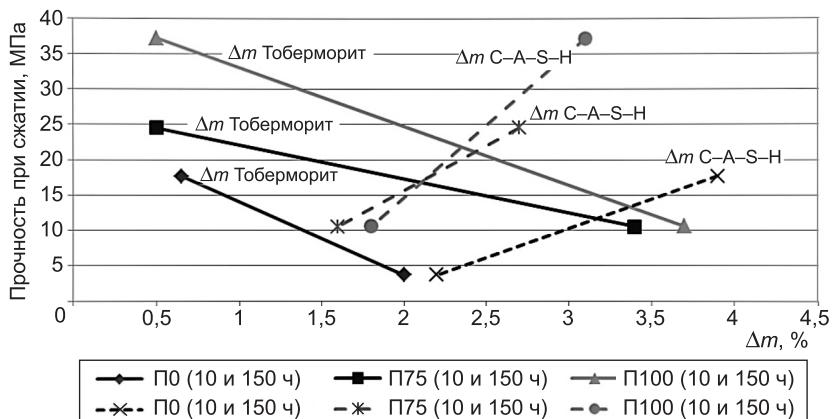


Рис. 5. Зависимость прочности камня от содержания в нем тоберморита и C-A-S-H фазы

— тоберморит, - - - гель C-A-S-H. Обозначение составов по рис. 1

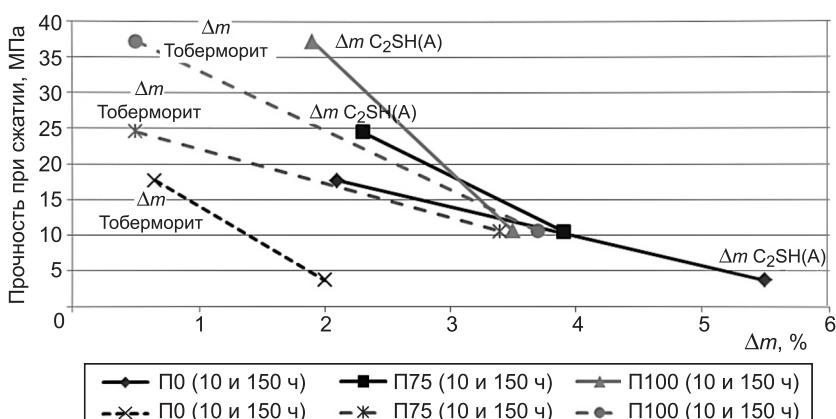


Рис. 6. Зависимость прочности камня от содержания в нем альфа-гидрата C_2S и тоберморита

— фаза $C_2SH(A)$, - - - тоберморит. Обозначение составов по рис. 1

ния, т. е. кристаллические фазы растут, а гель исчезает с увеличением длительности автоклавирования.

Содержание основных фаз в камне было соотнесено с его прочностью.

Как видно из рис. 5, количество С–А–С–Н фазы всегда способствует увеличению прочности камня, в то время как объем тоберморита в высокоосновных системах способствует ее снижению. А в соответствии с данными рис. 6 обе кристаллические фазы — и альфа-гидрат C_2S и тоберморит снижают прочность камня. При этом фаза $C_2SH(A)$ более интенсивно снижает прочность в чистой известково-кварцевой системе.

Выходы. Прочность известково-зольного и известково-зольно-кварцевого камня с массовым отношением извести к золошлакам, равным 1, но с основностью по коэффициенту основности около 1,5 пропорционально уменьшается с увеличением времени автоклавирования от 10 до 150 ч.

Основными гидратными фазами в таких высокоосновных запаренных системах являются гелевидная фаза С–А–С–Н, альфа-гидрат C_2S или фаза $C_2SH(A)$ и тоберморит. Их содержание и соотношение между ними зависит от длительности автоклавной обработки.

При коротких режимах запаривания в системе преобладает гелевидная фаза С–А–С–Н. Близка по содержанию к ней фаза $C_2SH(A)$. Тоберморит имеет подчиненное количество. Кроме этого здесь всегда присутствует несвязанная известь. При длительном автоклавировании главной фазой становится $C_2SH(A)$. Содержание гелевидной фазы значительно уменьшается, а тоберморита — увеличивается.

Прочность камня из указанных смесей прямо пропорциональна количеству гелевидной фазы С–А–С–Н и обратно пропорциональна содержанию фазы $C_2SH(A)$ и тоберморита.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Овчаренко, Г.И. Фазовый состав автоклавных известково-зольных материалов [Текст] / Г.И. Овчаренко, Д.И. Гильмияров // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 9. — С. 28–33.
2. Овчаренко, Г.И. Взаимосвязь прочности и фазового состава автоклавного известково-зольного камня [Текст] / Г.И. Овчаренко, Д.И. Гильмияров // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 10. — С. 28–32.

ОВЧАРЕНКО Геннадий Иванович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: egogo1980@mail.ru

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

МИХАЙЛЕНКО Андрей Андреевич, асп.; E-mail: andrexy@mail.ru

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Получено 22.11.13

Ovcharenko Gennady Ivanovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: egogo1980@mail.ru, Altai State Technical University of I.I. Polzunov, Barnaul, Russia

Mikhaylenko Andrei Andreevich, post-graduate student; E-mail: andrexy@mail.ru, Altai State Technical University of I.I. Polzunov, Barnaul, Russia

**RELATIONSHIP STRENGTH AND PHASE COMPOSITION
OF THE AUTOCLAVE LIME-FLY ASH STONE.**

Part II

Strength of the stone from lime-fly ash and lime-fly ash-quartz compositions with basicity 1,5 after autoclaving for 10, 50, 100 and 150 hours at 1,0 MPa isotherm is always directly proportional to the amount of gel C-A-S-H phase and inversely proportional to the alpha hydrate C_2S and tobermorite.

Key words: lime-fly ash and lime-fly ash-quartz compositions, autoclaving, the strength of the stone, the connection with the phase composition.

REFERENCES

1. O v c h a r e n k o, G.I. Phase composition of autoclave lime-ash materials [Text] / G.I. Ovcharenko, D.I. Gilmiyarov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2013. — N 9. — P. 28–33.
 2. O v c h a r e n k o, G.I. Relationship strength and phase composition of the lime-ash autoclaved stone [Text] / G.I. Ovcharenko, D.I. Gilmiyarov / / News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2013. — N 10. — P. 28–32.
-

УДК 691.42:661.31:620.18

А.Ю. СТОЛБОУШКИН, Г.И. БЕРДОВ, О.А. СТОЛБОУШКИНА,
В.И. ЗЛОБИН

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЖИГА НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КЕРАМИЧЕСКИХ СТЕНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД

Проведены исследования фазовых превращений и структурообразования при обжиге керамических стеновых материалов из тонкодисперсных отходов обогащения железных руд. Установлена зависимость влияния температуры обжига на процессы минералообразования и изменение количественного содержания аморфной фазы и пористости при формировании керамического черепка. В интервале 1050–1100 °C формирование новых минеральных фаз протекает наиболее интенсивно и способствует формированию прочной структуры изделий.

Ключевые слова: температура обжига, спекание, структура керамического черепка, техногенное сырье, железорудные отходы.

Физико-механические и эксплуатационные свойства керамических изделий обычно определяются завершенностью протекания твердофазных реакций и, следовательно, зависят от степени активации и дисперсности исходного сырья, структуры отформованного изделия, химического и фазового состава компонентов шихты, температурного режима обжига и характера газовой среды печи [1]. Обычно реакции в керамических масах протекают медленно вследствие того, что реагирующие твердые частицы имеют малые соприкасающиеся поверхности [2]. Повышение температуры обжига при значительном количестве плавней в материале способствует образованию жидкой фазы, интенсификации протекания реакций и в конечном итоге усилению процессов минералообразования.

Цель настоящей работы заключалась в изучении влияния температуры обжига на формирование структуры керамического черепка из тонкодисперсных железорудных отходов.

В качестве объекта при проведении исследований были выбраны наиболее массовые промышленные отходы Кузбасса: шламистая часть отходов (хвостов) мокрой магнитной сепарации после обогащения железных руд (ОЖР), которая является тонкодисперсным (средний размер частиц 15–50 мкм), малопластичным (число пластичности составляет 3–4), неспекающимся техногенным сырьем. Химический и минеральный состав железорудных отходов Абагурской и Мундыбашской обогатительных фабрик, входящих в состав ОАО «Евразруда» (Новокузнецк), приведен в работе [3].

По химическому составу отходы относятся к группе кислого сырья (Al_2O_3 — 8,4–9,8 %), с высоким содержанием красящих оксидов ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ — 12,7–14,5 %). Содержание свободного кварца состав-

ляет 33,2–37,1 %. Комплексное исследование фазового состава показало, что минеральный состав шламистой части хвостов представлен хлоритом, тонкодисперсными карбонатами, кварцем, полевыми шпатами, присутствуют амфиболы, пироксены, гематит и пирит. В качестве добав-

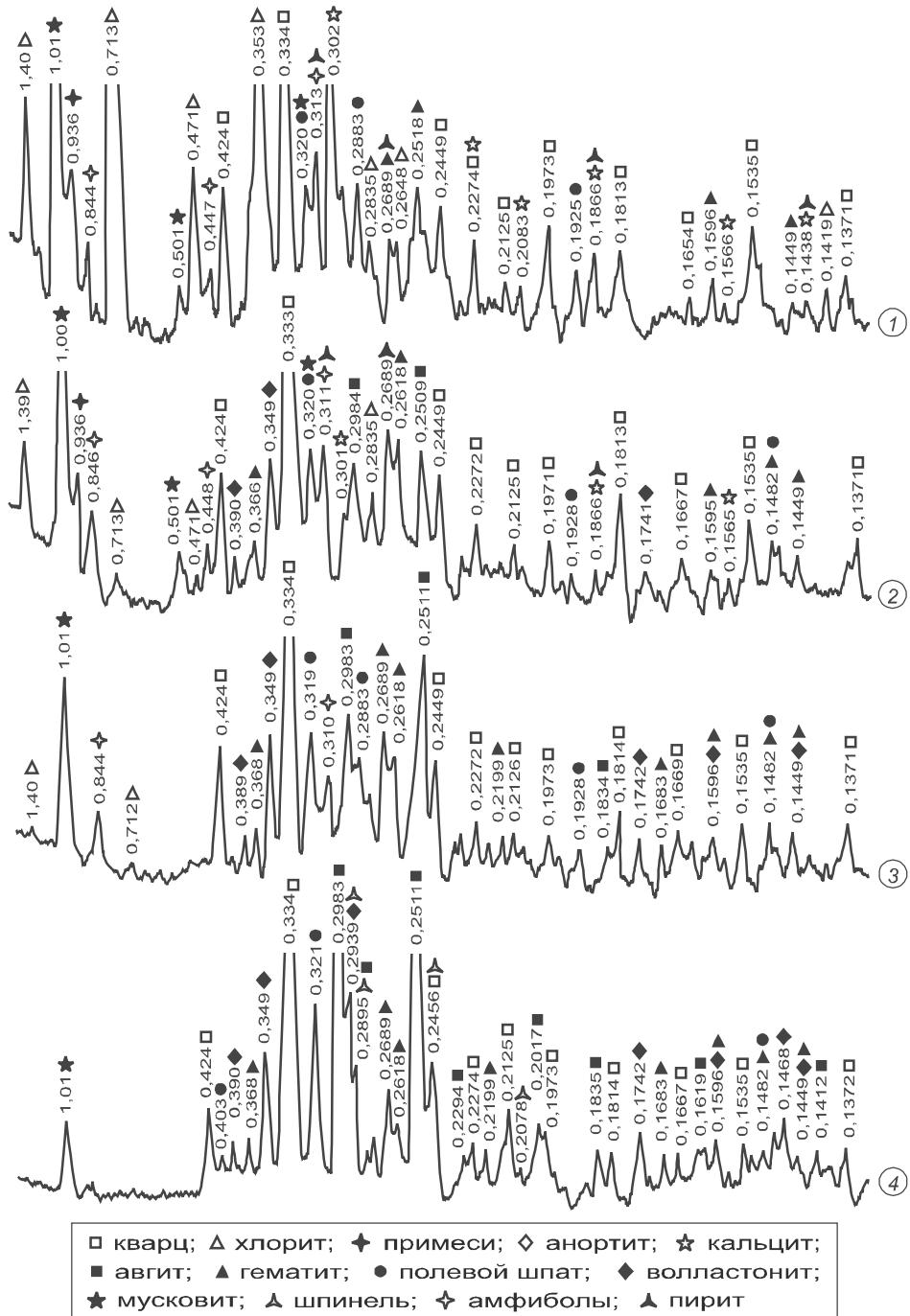


Рис. 1. Термодифрактограммы смеси состава 80 % шламистых железорудных отходов, 20 % новокузнецкого суглинка, снятые при температурах 500 °C (1); 800 (2); 900 (3); 1000 °C (4)

ки в состав шихты вводился новокузнецкий суглинок в количестве 20 мас.%. Суглинок — умеренно пластичный, низкодисперсный, с низким содержанием крупных и средних включений, относится к легкоплавкому, низкотемпературному, сильноспекающемуся сырью. По минералогическому составу соответствует группе полиминеральных глин каолинит-монтмориллонит-гидрослюдистого типа.

В лабораторных условиях из шихты на основе шламистой части отходов обогащения железных руд запатентованным способом изготавливались керамические образцы диаметром 45 мм и высотой 45–50 мм¹. Влажность пресс-порошка составляла 8–9 %. Режим прессования — двухступенчатый с односторонним приложением нагрузки, давление прессования 15 МПа. Обжиг проводился в лабораторной муфельной печи в диапазоне температур 500–1200 °С с изотермической выдержкой в течение часа.

Исследование влияния температуры обжига на протекание процессов минералообразования и формирование структуры в отформованных образцах проведено терморентгеновским, петрографическим методами анализа и ИК-спектроскопией поглощения порошков.

Терморентгенограммы образцов в интервале от 500 до 1000 °С (рис. 1) свидетельствуют о резком снижении интенсивности рефлексов хлорита и минералов карбонатной группы при температуре 800 °С, которые полностью исчезают после 900 °С. Дифракционные максимумы мусковита с ростом температуры также уменьшаются и при 1000 °С практически отсутствуют.

Разложение талькоподобного слоя железистого хлорита с освобождением катионов Fe²⁺ и Mg и декарбонизация тонкодисперсного CaCO₃ приводят к появлению свободных оксидов CaO, FeO, MgO, являющихся сильными плавнями. В результате уже при 800 °С появляется жидкая фаза, интенсифицирующая процессы минералообразования. Как следствие, свыше 800 °С при взаимодействии с кремнекислотой начинается образование зародышей авгита (Ca, Fe, Mg) SiO₃ и волластонита CaSiO₃, имеющих хорошо разрешимые рефлексы при 1000 °С.

При дальнейшем повышении температуры до 1100 °С интенсивность дифракционных максимумов, присущих авгиту и волластониту, продолжает возрастать (рис. 2), что свидетельствует о более интенсивном процессе образования высокотемпературных минералов. Однако начиная с 1150 °С несколько снижается, заметно уменьшаясь при 1200 °С (частичное расплавление образца). С ростом температуры до 1100 °С можно отметить лучшую разрешимость рефлексов гематита (0,2689; 0,2199; 0,1668; 0,1596; 0,1482; 0,1449 нм), которые при 1150 °С исчезают.

Под микроскопом в области указанных температур также наблюдается образование и увеличение количества оксида железа Fe³⁺ в виде зерен и агрегатов размером до 20 мкм. Магнетит присутствует в виде непрозрачных дисперсных частиц. При нагреве в интервале 1000–1150 °С про-

¹ Пат. 2500647 Россия, С1 С 04 В 33/132. Сырьевая смесь для изготовления стенной керамики и способ ее получения / А.Ю. Столбоушкин, Г.И. Стороженко, А.И. Иванов и др. Опубл. 10.12.2013, Бюл. № 34.

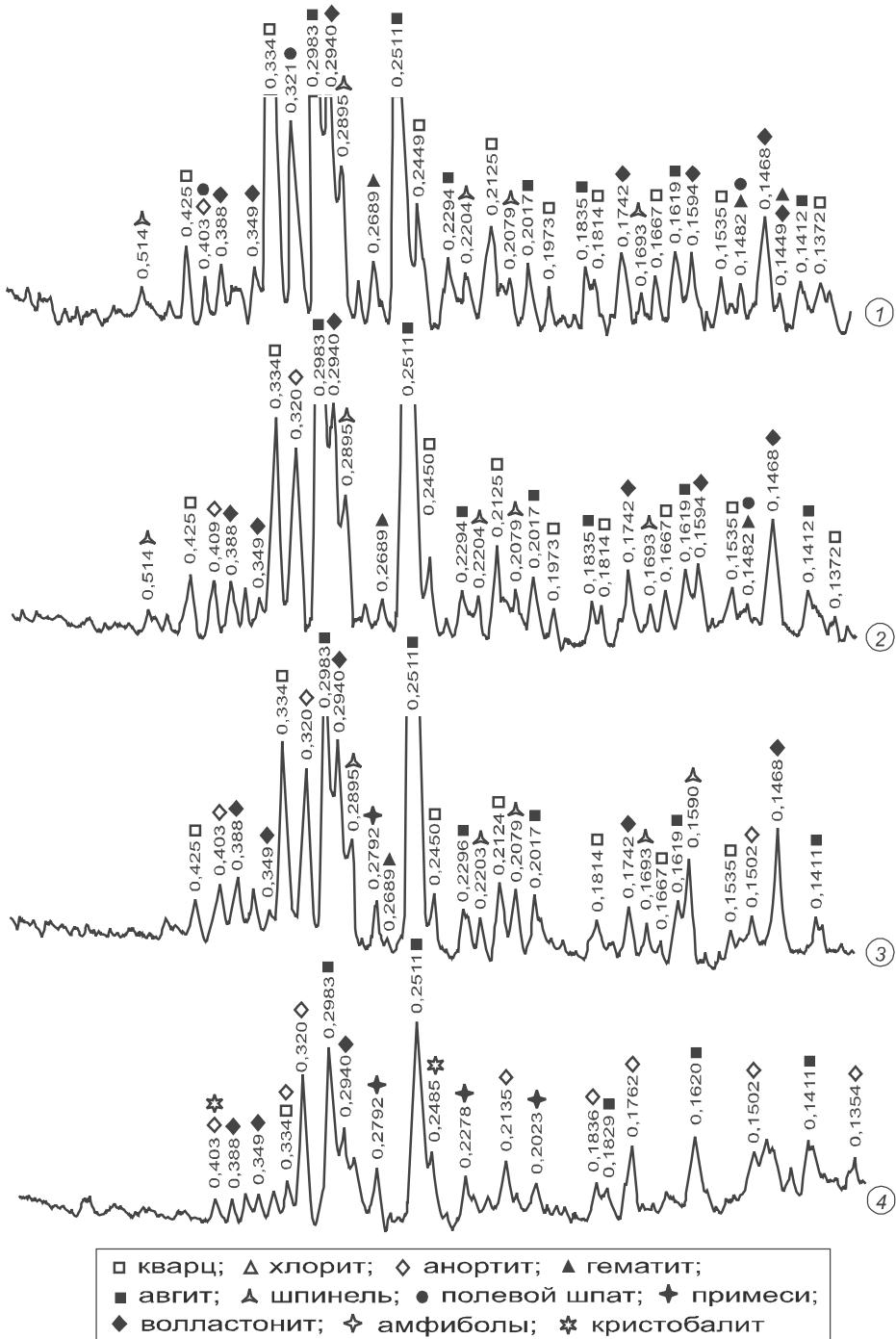


Рис. 2. Термодифрактограммы смеси состава 80 % шламистых железорудных отходов, 20 % новокузнецкого суглинка, снятые при температурах 1050 °C (1); 1100 (2); 1150 (3); 1200 °C (4)

исходит последовательное увеличение степени окисления Fe^{2+} , вызывающее изменение интенсивности бурой окраски материала (рис. 3), и увеличение количества авгита от 5 до 30 % с повышающимся содержанием Fe^{3+} в твердом растворе по мере увеличения температуры обжига.

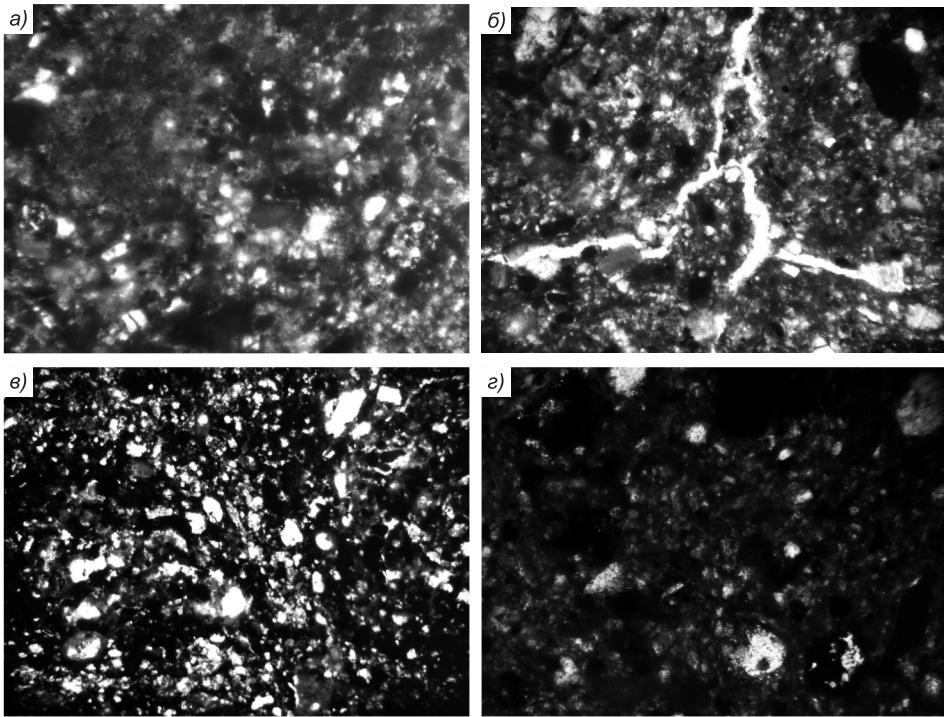


Рис. 3. Микрофотографии керамических образцов на основе шламистых железорудных отходов. Шлиф, проходящий свет, 100 \times , николи II. Температура обжига 1000 °С (а); 1050 (б); 1100 (с); 1150 °С (д)

Температура 1150 °С характеризуется началом снижения интенсивности рефлексов всех основных минеральных фаз материала. Хорошо заметен этот процесс по пикам кварца. Так, наиболее характерные для него дифракционные максимумы (0,425; 0,334; 0,245 нм) уменьшаются до уровня фона и практически отсутствуют при 1200 °С.

Зависимость изменения содержания аморфной фазы и пористости образцов от температуры обжига приведена на рис. 4. Пористость материала возрастает в интервале 800–900 °С, что свидетельствует о разложении карбонатов с выделением CO₂, и незначительно уменьшается в

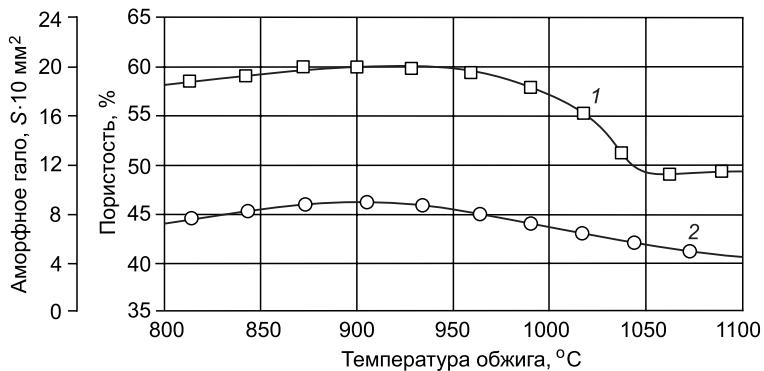


Рис. 4. Изменение содержания рентгеноаморфной фазы (1) и пористости (2) образцов на основе шламистых железорудных отходов в зависимости от температуры обжига

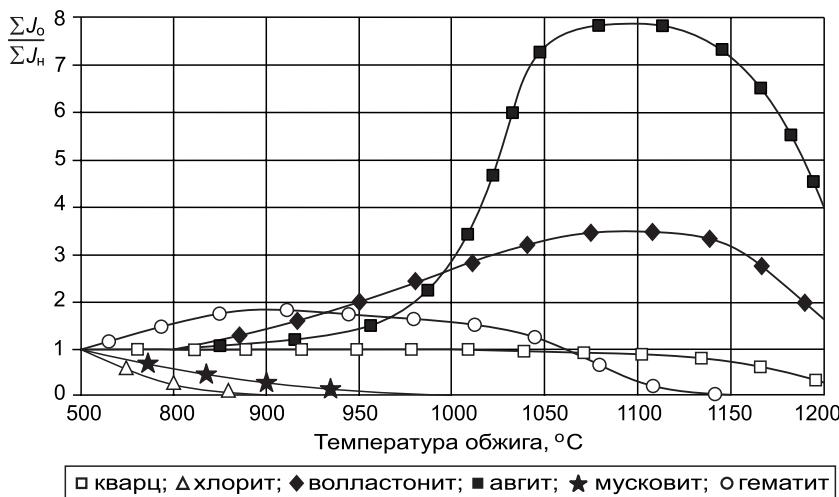


Рис. 5. Изменение суммарной интенсивности линий минералов при обжиге образцов на основе шламистой части отходов обогащения железных руд

процессе спекания. Содержание рентгеноаморфной фазы, оценившееся по площади аморфного гало, показывает, что увеличение температуры до 1000 °С не вносит существенных изменений в фазовый состав. При 1050–1100 °С наблюдается значительное снижение содержания аморфной фазы, свидетельствующее об интенсификации процесса минералообразования.

Отношение суммарных интенсивностей дифракционных максимумов основных высокотемпературных минералов при обжиге образцов на основе шламистой части отходов обогащения железных руд (рис. 5) подтверждает, что в интервале 1050–1100 °С процесс минералообразования протекает наиболее интенсивно и способствует формированию прочной структуры керамических матричных композитов².

Данные ИК-спектров образцов, обожженных при различных температурах (рис. 6), подтверждают установленный характер процессов минералообразования. Полосы поглощения валентных колебаний OH-групп слоистых силикатов в области частот 3300–3700 см⁻¹ практически исчезают при 900 °С, что свидетельствует о разложении этих минералов.

В области деформационных колебаний атомных групп минералов в интервале спектра 900–1100 см⁻¹, соответствующем валентным колебаниям групп Si–O различных силикатов, наблюдается перераспределение полос поглощения с ростом температуры. Так, при 1000 °С и выше появляются полосы поглощения 575, 920, 950, 1060 см⁻¹ и 470, 495, 520, 870, 1070 см⁻¹, принадлежащие соответственно волластониту и авгиту.

Используя закон Бугера–Ламберта–Бера [4], по оптической плотности в максимумах полос поглощения ИК-спектра проведен полукачественный анализ изменения содержания авгита и волластонита с ростом

² Столбоушкин А.Ю. Теоретические основы формирования керамических матричных композитов на основе техногенного и природного сырья // Строительные материалы. 2011. № 2. С. 10–13.

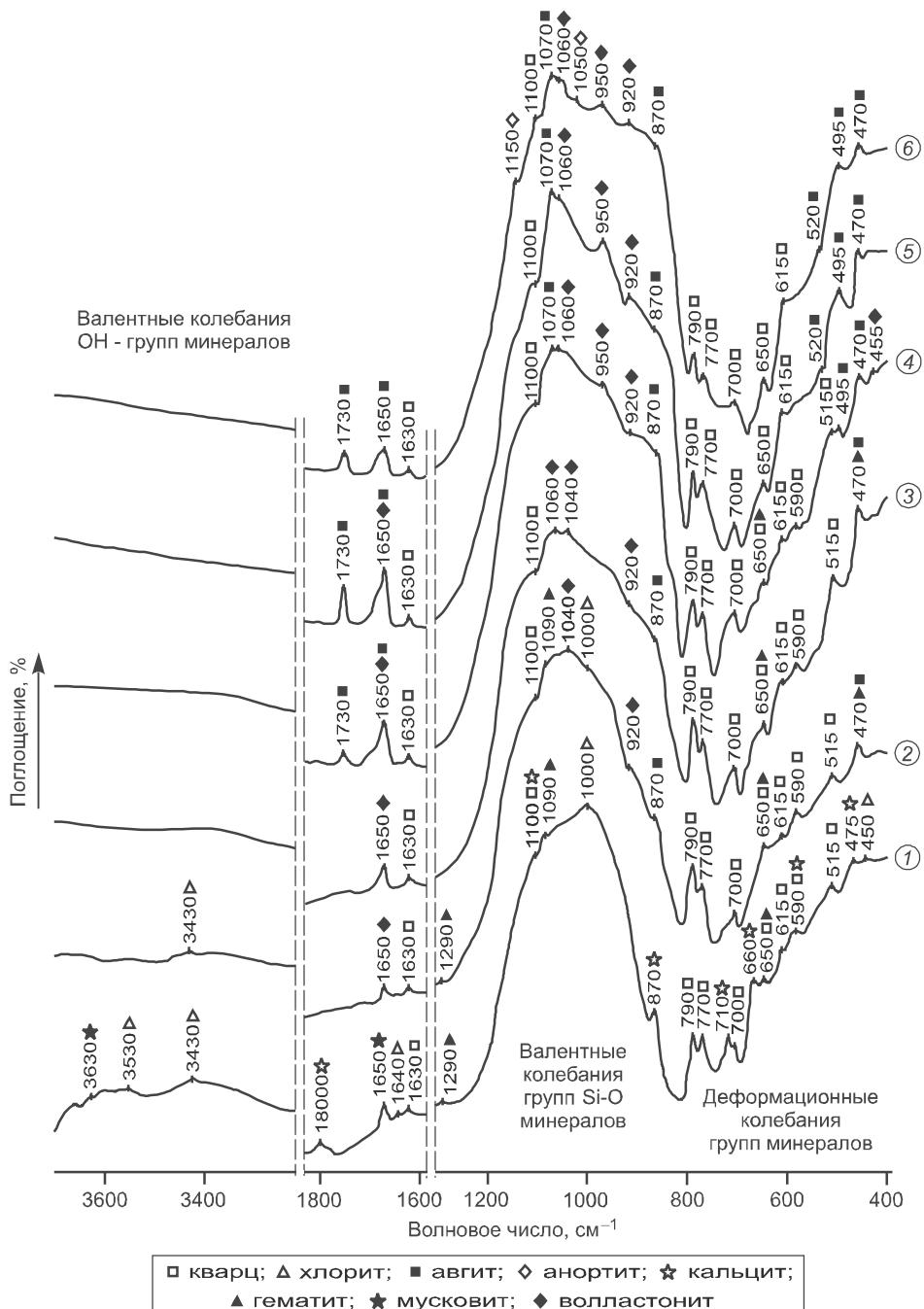


Рис. 6. ИК-спектры керамических образцов на основе шламистой части отходов обогащения железных руд, обожженных при температурах 500 °C (1); 800 (2); 900 (3); 1000 (4); 1100 (5); 1200 °C (6)

температуры (рис. 7). Характер этого изменения совпадает с зависимостью отношения суммарных интенсивностей дифракционных максимумов минералов от температуры.

Таким образом, наиболее интенсивно физико-химические и фазовые превращения в исследованном материале протекают при температуре

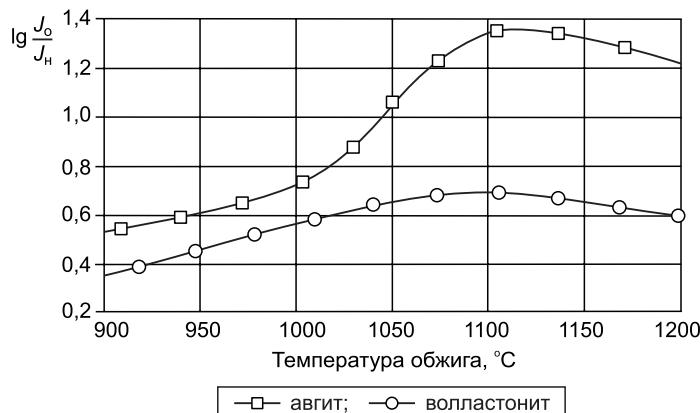


Рис. 7. Изменение оптической плотности в максимумах полос поглощения ИК-спектров при обжиге образцов на основе шламистой части отходов обогащения железных руд

1050–1100 °С, обусловливая высокие физико-механические показатели образцов.

В результате проведенных исследований выявлены особенности фазовых превращений и структурообразования стенового керамического материала на основе шламистой части отходов обогащения железных руд. Формирование керамического матричного композита с сотовообразной структурой, образование при обжиге новых минеральных фаз с обилием стеклофазы в дисперсионной среде, развитая равномерная пористость обеспечивают высокие прочностные показатели образцов (предел прочности при сжатии более 20 МПа).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Павлов, В.Ф. Физико-химические основы обжига изделий строительной керамики [Текст] / В.Ф. Павлов. — М. : Стройиздат, 1976. — 240 с.
- Зальманг, Г. Физико-химические основы керамики [Текст] / Г. Зальманг. — М. : Госстройиздат, 1959. — 396 с.
- Столбоушкин, А.Ю. Необходимость и перспективы утилизации шламистых железорудных отходов Кузбасса в технологии стеновых керамических материалов [Текст] / А.Ю. Столбоушкин, Г.И. Стороженко // Строительные материалы. — 2009. — № 4. — С. 77–80.
- Смит, А. Прикладная ИК-спектроскопия. Основы, технико-аналитическое применение [Текст] / А. Смит. — М. : Мир, 1982. — С. 235–240.

СТОЛБОУШКИН Андрей Юрьевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: stanyr@list.ru
 Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк
 БЕРДОВ Геннадий Ильич, д-р техн. наук, проф.
 Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
 СТОЛБОУШКИНА Оксана Андреевна, канд. техн. наук; E-mail: stoxan@gmail.com
 Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк
 ЗЛОБИН Владимир Иванович, доц.; E-mail: zlobinvi@mail.ru
 Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

Получено 21.11.13

Stolboushkin Andrey Yurievich, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: stanyr@list.ru, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Berdov Gennady Ilyich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Stolboushkina Oksana Andreevna, candidate of technical sciences; E-mail: stoxan@gmail.com, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Zlobin Vladimir Ivanovich, assistant professor; E-mail: zlobinvi@mail.ru, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

FIRING TEMPERATURE IMPACT ON STRUCTURE FORMING IN CERAMIC WALL MATERIALS PRODUCED OF FINE DISPERSED IRON ORE ENRICHMENT WASTES

The research of phase transformations and structure forming during firing of ceramic wall materials produced of fine dispersed iron ore tailings has been carried out. Dependence of firing temperature impact on mineralization processes and change in quantitative content of the amorphous phase and porosity during ceramic crock forming has been traced. Within the range of 1050–1100 °C formation of new mineral phases occurs most intensively and contributes to formation of stable structure of the product.

Key words: firing temperature, sintering, ceramic crock structure, technogenic resources, iron ore wastes.

REFERENCES

1. Pavlov, V.F. Physical and chemical basis of building ceramics firing [Text] / V.F. Pavlov. — M. : Stroyizdat, 1976. — 240 p.
 2. Zalmang, G. Physical and chemical basis of ceramics [Text] / G. Zalmang. — M. : Gosstroyizdat, 1959. — 396 p.
 3. Stolboushkin, A.Yu. Need and prospects of Kuzbass slimy iron ore wastes disposal in ceramic wall materials production technology [Text] / A.Yu. Stolboushkin, G.I. Storozhenko // Building materials. — 2009. — N 4. — P. 77–80.
 4. Smith, A. Applied infrared spectroscopy. Fundamentals, technical and analytical application [Text] / A. Smith. — M. : Mir, 1982. — P. 235–240.
-

УДК 691:678.65:620.17

**Р.М. СИНЕЛЬНИКОВА, А.Г. КУЧЕРЕНКО, М.В. ДЮЛЬДИНА,
В.Г. МАКАРОВ**

ОСОБЕННОСТИ ФОРМОВАНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ФУТЕРОВОК

Рассмотрено влияние структуры и состава ламинатной части стеклопластиковой футеровки, формуемой ручной выкладкой, на проницаемость и физико-механические свойства антакоррозионного покрытия.

Ключевые слова: стеклопластиковая футеровка, коэффициент ламинации, развес, стекломат, поверхностная плотность, коэффициент проницаемости.

Антакоррозионные покрытия крупногабаритного производственного оборудования для хранения промышленных стоков, ведения технологических процессов, транспортировки агрессивных сред и т.п. прочно вошли в практику промышленного строительства, составляя 13–17 % от стоимости монтажных работ [1].

На рынке России в настоящее время представлен обширный ассортимент химически стойких эпоксидных и ненасыщенных полиэфирных смол как отечественных (ПН-101, ПН-15, Камфэст-01А и т.п.), так и импортных, поставляемых фирмами Reichhold (Polylite-250, Dion 9100 и т.п.), Ashland (Hetron 800 и т.п.). Эти смолы при правильном выборе гарантируют несколько десятилетий безотказной работы скрубберов, боровов, емкостей под налив агрессивных сред, газоходов, кислотных ванн и другого технологического оборудования металлургических, нефтехимических и химических производств.

Учитывая, что технологическое оборудование, выполненное из металла, бетона или намотанного стеклопластика, подвергается электрохимической коррозии, химической деструкции или просто проницаемости для производственной среды, его ресурс, безотказность, ремонтопригодность определяются качеством стеклопластиковой футеровки, формуемой ручной выкладкой [2].

Стеклопластиковая футеровка представляет многослойную конструкцию, состоящую из слоя монолитной химически стойкой смолы, толщиной 0,014–0,016 мм (гелькоут), слоя смолы, армированной 2–3 слоями лавсановой или стеклянной вуали, толщиной 0,2 мм (первый химически стойкий слой) и ламинатной части — слоя смолы, армированной до 12 и выше слоями порошково-связанного жесткого отечественного (МА 643) или импортного (М 601) стекломата, толщиной до 5,5 мм (второй химически стойкий слой).

Слабоармированный слой футеровки содержит до 90 % смолы и вместе с гелькоутом выполняет защитно-изоляционные функции. Ламинатная часть, содержащая 60–75 % смолы, выполняет как силовые, обеспечивающие устойчивость покрытия, так и защитно-изоляционные функции,

являясь дополнительным диффузионным барьером для агрессивной производственной среды. Более того, при возникновении экстремальных ситуаций, например, тепловом ударе и растрескивании гелькоута диффузионное сопротивление ламинатной части стеклопластиковой футеровки предотвращает внезапный отказ изделий и обеспечивает дальнейшую эксплуатацию оборудования в межремонтный период. Поэтому оптимальный состав и структура ламината в значительной части определяют резервирование и сохранение безотказности экологически опасного технологического оборудования.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния структуры и состава ламинатной части стеклопластиковой футеровки на эксплуатационные показатели антикоррозионного покрытия.

При формировании стеклопластиков на основе стекломатов методом ручной выкладки определяющими технологическими параметрами являются рецептура инициирующей системы, коэффициент ламирования, развес стеклонаполнителя, а также возможность взаимозамены матов различной поверхностной плотности. Соотношение компонентов связующего обычно приводится поставщиком для конкретной смолы и требуемого режима отверждения, в то время как структура футеровки определяется производителем.

Коэффициент ламирования, определяющий соотношение компонентов в ламинате, представляет отношение массы связующего, используемого для пропитки пакета стеклонаполнителя, к массе стекломатов, а развес, обеспечивающий защитно-изоляционные и прочностные свойства, представляет назначаемую при формировании суммарную поверхностную плотность всех стекломатов пакета, $\text{г}/\text{м}^2$.

Для исследования влияния состава и структуры ламинатной части на физико-химические, прочностные и диффузионные показатели ламината были использованы коэффициенты ламирования 2,0; 2,475; 2,52; 2,75 и 3,025 при величине развеса от 600 до 3000 $\text{г}/\text{м}^2$ для стекломатов с различной поверхностной плотностью.

Образцы ламинатов формовали в виде пластин размером 500×500 мм, укладывая последовательно до 12 слоев жесткого стекломата МА 643 из рубленых стеклонитей, поверхностной плотностью 300, 450 и 600 $\text{г}/\text{м}^2$, пропитанных связующим на основе эпоксивинилэфирной смолы марки Norgpol Dion 9100. Для отверждения использовалась инициирующая система: на 100 мас. ч. смолы 2 мас. ч. Norgpol Peroxides № 11 (45%-й раствор перекиси метилэтилкетона в диметилфталате) с содержанием активного кислорода 9,1 % и 3 мас. ч. ускорителя — октоата кобальта (Norgpol Accelerators 9800). После 24 ч отверждения при 24 °C и давлении 0,012 МПа проводилась термообработка (постотверждение) при 60 °C в течение 24 ч. Из отформованных пластин вырезали полоски-образцы 10×10 для определения состава стеклопластика выжиганием, полоски длиной 150 и шириной 10 мм для механических испытаний, а также по два образца диаметром 150 мм для оценки водопроницаемости мембранным методом. Определение разрушающего напряжения при растяжении проводили по ГОСТ 25.601–80 с помощью пресса УММ-20 при скорости

движения подвижного захвата 10 мм / мин. Количество образцов каждого типа составляло не менее 5.

Футеровочный слой изготавливали после установления оптимального состава ламинатной части для матов различной поверхностной плотности, укладывая два слоя стекловуали марки М 3022, поверхностной плотностью 30 г / м² и выкладывали ламинатную часть после желирования связующего.

На рис. 1 приведена экспериментальная, определенная выжиганием зависимость содержания стеклонаполнителя в ламинате от назначенного коэффициента ламинарирования.

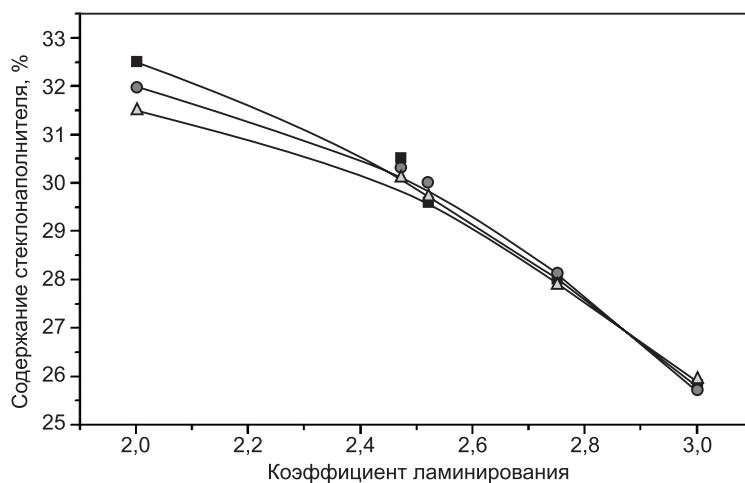


Рис. 1. Влияние коэффициента ламинарирования на содержание стеклонаполнителя в ламинатной части футеровки

Поверхностная плотность стекломата МА 643: ■ 600 г / м², ● 450 г / м², ▲ 300 г / м²

Нетрудно отметить, что при коэффициенте ламинарирования выше 2,48 независимо от поверхностной плотности стекломата содержание связующего остается практически одинаковым. Например, при коэффициенте ламинарирования 2,52 содержание наполнителя в ламинатах, отформованных из стекломатов с поверхностной плотностью 600, 450 или 300 г / м², находится в пределах от 29,6 до 29,9 мас. %. Следовательно, стекломаты МА 643 различной поверхностной плотности допускают взаимозамену при формировании ламинатов. Например, структура из четырех слоев стекломатов с поверхностной плотностью 300 г / м² по составу отвечает ламинату с двумя слоями стекломата поверхностной плотностью 600 г / м² и т.д. Это позволяет достигать назначенный при ручной выкладке развес, используя стекломаты различной поверхностной плотности.

На рис. 2 представлена пористость ламинатов в зависимости от предыстории. С точки зрения монолитности ламината, его минимальной пористости 1,5–1,1 % оптимальная величина отвечает коэффициенту ламинарирования от 2,48 до 2,51, что соответствует содержанию стеклонаполнителя 28,9–30,5 %. Вне диапазона значений этого технологического

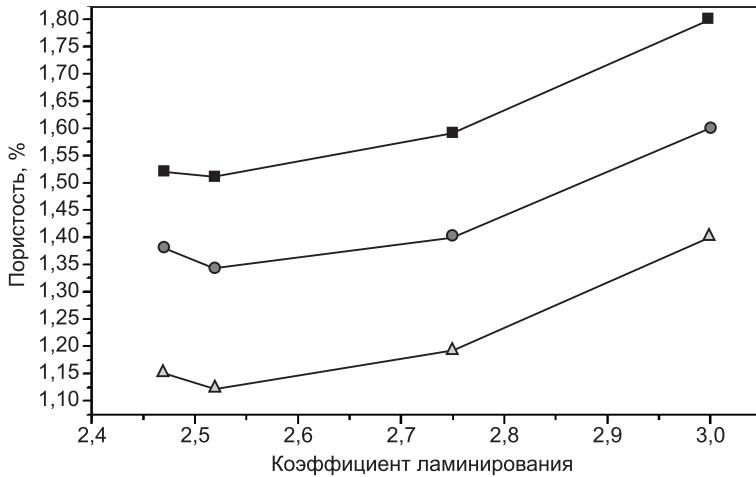


Рис. 2. Зависимость пористости ламинатной части футеровки от величины коэффициента ламинирования

Поверхностная плотность стекломата MA 643: ■ 300 г/м², ● 450 г/м², ▲ 600 г/м²

показателя количества связующего либо недостаточно для пропитки наполнителя, либо избыточно.

Защитно-изоляционные качества покрытия характеризуются коэффициентом проницаемости. Исследования водопроницаемости ламинатов показали, что при армировании стекломатом большей поверхностной плотности водопроницаемость ниже. Например, для трехслойного ламината на основе стекломатов поверхностной плотностью 600, 450 и 300 г/м² коэффициенты проницаемости составляют соответственно $72,9 \cdot 10^{-11}$, $73,9 \cdot 10^{-11}$ и $74,6 \cdot 10^{-11}$ г/(см · с). Близкая проницаемость ($72,9-72,7) \cdot 10^{-11}$ г/(см · с) достигается в ламинате, содержащем три слоя MA 643 поверхностной плотностью 600 г/м², четыре слоя поверхностной плотностью 450 г/м² или шесть слоев 300 г/м². Данная величина коэффициента водопроницаемости соответствует диффузионному механизму переноса. Таким образом, ламинатная часть футеровки при содержании связующего наполнителя 28,5–30,5 мас. % при использовании стекломатов различной поверхностной плотности, но обеспечивающих величину развеса не менее 1800 г/м², гарантирует непроницаемость стеклопластиковой футеровки.

На рис. 3 приведена зависимость разрушающего напряжения ламината от развеса стеклонаполнителя ламинатной части.

С увеличением развеса стеклонаполнителя разрушающее напряжение ламината снижается от 120, 124 и 126,8 МН/м² для двухслойного ламината поверхностной плотностью 300, 450 и 600 г/м² до соответственно 109 МН/м² при 12-слойном армировании стекломатами 300 г/м²; 111 МН/м² при 10-слойном армировании матами плотностью 450 г/м² и 124 МН/м² для 3-слойного плотностью 600 г/м², что обусловлено масштабным эффектом прочности из-за наличия дефектов полимерной матрицы, играющих роль слабого звена при механических испытаниях [3]. Тем не менее эти значения разрушающего напряжения при растяжении

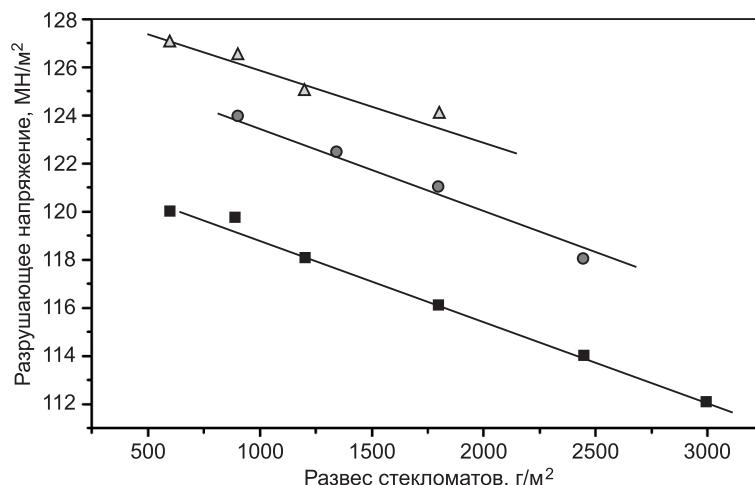


Рис. 3. Зависимость прочности ламината от развеса стеклонаполнителя
Поверхностная плотность стекломата МА 643: ■ 600 г/м², ● 450 г/м²,
▲ 300 г/м²

обеспечивают стеклопластиковой футеровке 4–5-кратный запас прочности [4].

Увеличение толщины защитного покрытия за счет ламинатной части повышает несущую способность и жесткость футеровки, однако из-за масштабного эффекта физических свойств, связанного с появлением в объеме стеклопластиковой футеровки слабого звена в виде дефектов, пор, трещин и т.п. нарушений сплошности полимерной матрицы, выступающих в роли концентраторов напряжения или транспортных пор, по мере увеличения толщины, происходит естественное снижение значений прочности и диффузионного сопротивления.

Анализ полученных результатов показал, что оптимальный состав ламинатной части достигается при развесе стеклонаполнителя 1800 г/м² и коэффициенте ламинирования 2,48–2,52. Структура ламината может выкладываться из трех слоев МА 643 поверхностью плотностью 600 г/м², четырех слоев плотностью 450 г/м² или шести слоев 300 г/м². В этом случае ламинат будет содержать не более 1,5 % пор, иметь толщину 4,4–4,5 мм, обладать диффузионной проницаемостью и 4–5-кратным запасом прочности.

В таблице приведены свойства стеклопластиковой футеровки с ламинатной частью на основе стекломатов различной поверхностной плотности.

Как показали дополнительные исследования, при ручной выкладке футеровочного слоя на основе Dion 9100, состоящих из двух слоев стекловуали М-3010 с развесом 30 г/м² и ламинатной части с коэффициентом ламинирования 2,48 (три слоя МА 643 поверхностью плотностью 300, четыре слоя — 450 г/м² или три слоя 600 г/м²), футеровка имеет разрушающее напряжение при изгибе 145–152 МН/м², сжатии 175–179 МН/м², модуль упругости при растяжении 4380 МН/м².

Структура ламинатной части футеровочного слоя, отвечающая развесу 1800 г/м², использовалась при формировании стеклопластиковых скруб-

Оптимальный состав и свойства стеклопластиковой футеровки

Поверхностная плотность МА 643, г / м ²	Количество слоев МА 643	Толщина, мм	Разрушающее напряжение футеровки σ , МН/м ²	Содержание наполнителя $\Phi_{2\text{mac}}$, мас. %	Коэффициент водопроницаемости $P \cdot 10^{-9}$, г/(см · с)
300	6	4,7	101/116	32,0	0,61
450	4	4,6	106/122	31,8	0,606
600	3	4,6	107/126	32,0	0,597

беров, газоходов, кислотных ванн, трубных систем технологического оборудования на Новокуйбышевском нефтеперерабатывающем заводе и Магнитогорском горнometаллургическом комбинате.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник по композиционным материалам [Текст] / под ред. Дж. Любина; в 2-х кн. — Кн. 2. — М. : Машиностроение, 1988. — 584 с.
2. Mallinson, J.H. Corrosion Resistant Plastic Composites in Chemical Plant Design [Текст] / J.H. Mallinson. — 2 ed. — L. : CPC Press, 1987. — 592 p.
3. Макаров, В.Г. Масштабный эффект свойств стеклопластиковых футеровок [Текст] / В.Г. Макаров, Р.М. Синельникова, А.А. Александров // Изв. вузов. Строительство. — 2007. — № 5. — С. 22–25.
4. Обухов, А.С. Расчет на прочность конструкций из стеклопластиков и пластмасс в нефтеперерабатывающей и химической промышленности [Текст] / А.С. Обухов. — М. : Машиностроение, 1978. — 142 с.

СИНЕЛЬНИКОВА Раиса Михайловна, канд. техн. наук, доц.

Самарский государственный технический университет

КУЧЕРЕНКО Артем Геннадьевич, асп.

Самарский государственный технический университет

ДЮЛЬДИНА Мария Владимировна, канд. техн. наук

Самарский государственный технический университет

МАКАРОВ Валерий Глебович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: valgleb@yandex.ru

Самарский государственный технический университет

Получено 19.11.13

Sineelnikova Raisa Mikhailovna, candidate of technical sciences, assistant professor, Samara State Technical University, Russia

Kucherenko Artem Gennadievich, post-graduate student, Samara State Technical University, Russia

Dyuldina Mariya Vladimirovna, candidate of technical sciences, Samara State Technical University, Russia

Makarov Valery Glebovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: valgleb@yandex.ru, Samara State Technical University, Russia

FEATURES OF FORMATION OF FIBERGLASS LININGS

Influence of structure and structure of laminate part of the fiberglass lining formed by the manual calculation, on permeability and the physicist – mechanical properties of an anticorrosive covering is considered.

Key words: fiberglass lining, lamination coefficient, weighing, glass fibre mat, area density, permeability coefficient.

REFERENCES

1. The reference book on composite material [Text] / under edition J. Lyubina; in 2 books. — Book 2. — M. : Mechanical engineering, 1988. — 584 p.
 2. Mallinson, J.H. Corrosion Resistant Plastic Composites in Chemical Plant Design [Text] / J.H. Mallinson. — 2 ed. — L. : CPC Press, 1987. — 592 p.
 3. Makarov, V.G. Large-scale effect of properties of fiberglass linings [Text] / V.G. Makarov, R.M. Sinelnikova, A.A. Alexandrov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2007. — N 5. — P. 22–25.
 4. Obuhov, A.S. Calculation on durability of designs from fibreglasses and plastic in the oil-processing and chemical industry [Text] / A.S. Obuhov. — M. : Mechanical engineering, 1978. — 142 p.
-

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 69.05:658.5.012.2

**В.В. ГЕРАСИМОВ, О.А. КОРОБОВА, Г.К. ЩЕПОТИН,
О.Ю. МИХАЛЬЧЕНКО**

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМОТЕХНИКИ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Предложен методический подход проектирования строительных объектов на основе системного взаимодействия технических параметров структуры, процессов и механизмов оптимизации параметров ПОС и ППР с оценкой организационно-технологической эффективности проектных решений.

Ключевые слова: системотехника, организационно-технологические решения, строительство, объект, методика, эффективность.

Проектные решения в сфере строительного производства формируются на основе системного подхода, который обуславливает взаимосвязь в структурах — между объемами работ в рамках организационных решений, в процессах — между мощностями в рамках технологических решений, в механизмах — между параметрами организационно-технологических решений (ОТР). При этом проблемы управления координацией решений обусловлены разнонаправленностью системных векторов их параметров. Так, на уровне ПОС параметры объемов работ распределяются в соответствии с архитектурой объемно-конструктивных решений объектов и правилами теории потоков. Оценка качества решений не учитывает возможности реализации на их уровне строительных организаций, которые уточняются впоследствии в ППР и производственных планах организаций (ППО). Это обусловлено тем положением, что ПОС является стратегическим документом, а остальные соответственно тактическими и программными оперативными документами.

Особенность решений ППР — представление потока объектов средствами реализации — мощностями по выполнению работ. При этом сохраняется формат решений, принятый в ПОС. На уровне ППО решения и параметры потенциала мощностей организации могут не соответствовать требованиям формата проектных решений, что снижает уровень качества решений и, следовательно, эффективность использования ресурсов. Наличие данной проблемы обусловлено также и тем, что нормативными документами регламентируются только проектные документы, способствуя созданию теоретической модели, не полностью учитывающей реальные возможности производственной сферы. Важным становится подход, при котором должны учитываться решения на трех уровнях — ПОС, ППР и ППО. Это

соответствует системотехническому подходу, предусматривающему взаимосвязь и взаимодействие параметров на всем протяжении этапов жизненного цикла строительного объекта, включая формирование виртуальной модели объекта и его управления в процессе реализации этой модели [1].

Практика показывает, что системотехнический подход должен являться базовым методологическим решением в системе управления проектами, поскольку его форматами и решениями предусматриваются не только технологии управления по отклонениям и изменениям, но регламентируются процессы трансформации параметров строительного проекта [2].

Областью исследований становится комплекс параметров проекта, включающих объемно-конструктивные, организационно-технологические и управленические проектно-строительные решения, изменяемые в процессе реализации проектов и программ строительства объектов с наибольшей эффективностью. Важная проблема разработки системотехнических решений (СТР) — различие параметров решений, установленных на этапе проектирования, и параметров, формирующихся в реальном времени осуществления строительных проектов. Основу проблемы составляет несоответствие комплекса параметров проекта комплексу параметров строительных организаций, которые вынуждены осуществлять маневры с потенциалом мощностей организаций. Это обусловлено разноритмичностью потоков объемов работ объекта и равноритмичностью мощностей строительного производства; слабой ориентированностью решений на прогнозные риски выполняемых в дальнейшем работ; недостаточностью разработанности методических основ управления механизмом адаптации исходных проектных параметров в процессе реализации объектов. Сущностью адаптации является система связывания параметров и их корректировка с учетом условий внешней среды реализации проектов [3]. При этом за счет своевременной и обоснованной реакции на изменение или отклонение комплекса параметров повышается эффективность управления реализацией проектно-строительных решений. В общем виде должна осуществляться задача компромисса между потерями качества теоретически обоснованных проектных решений и ценой потерь в сфере реализации из-за неготовности их осуществления со стороны строительных организаций.

Для решения проблемы проведены исследования проектных материалов и исполнительских документов строительных организаций и предприятий и установлено следующее:

- проектные стандарты ОТР разрабатываются для детерминированных условий, а оптимизация ресурсных динамик оценивается локальными оценками вариантов решений;
- методические инструкции проектных стандартов не ориентированы на оптимизацию ОТР по этапам динамики жизненного цикла проекта;
- ОТР проектов слабо ориентированы на механизм взаимодействия с внешней средой и реакции на внутренние производственные факторы;
- критерии качества ОТР в проектном и плановом процессе реализации объектов строительства не имеют соответствующей методической поддержки.

Практика показывает, что уровень качества ОТР на проектном этапе отображается векторами оценок равномерности и непрерывности, кото-

рые не проверяются на эффективность соответствия мощностям строительной организации, осуществляющей реализацию объектов. Уровень качества технологических решений на проектном этапе отображается векторами оценок технологичности мощностей с циклом по технологическим переделам строительного процесса. В этом случае вектор параметров, оптимизированный по критериям экономической эффективности организации выступает в качестве объекта управления в пространстве изменения параметров ресурсного потока в зависимости от факторов внешней и внутренней среды организации. Основной задачей служит управление по изменяемым параметрам процессов с критериями качества использования ресурсов в потоках работ.

Ниже приведены положения по адаптивному управлению динамическими процессами строительства при последовательной оптимизации параметров комплексного процесса строительства объектов на основе управления по отклонениям с оценкой критерии качества процессов:

— календарный план и календарный график как теоретическая модель связывания ресурсов и план-программа как модель реализации связанных ресурсов являются основными инструментами управления отклонениями и изменениями архитектуры связанных ресурсов объекта;

— использование адаптации исходных параметров проектных решений обусловлено необходимостью приспособления наиболее эффективным образом параметров деятельности организации, определенных на основании ОТР проекта, к изменяемым условиям по критериям качества, отображающим экономическую эффективность деятельности организации и идентификации уровня последствий, которые могут вызывать угрозы экономических потерь организации;

— адаптационный механизм включает процессы корректировки параметров проектных решений в соответствии с потенциалом для снижения экономических потерь организации;

— в качестве оценки группировки параметров ресурсных потоков принимаются критерии качества сбалансированности объемов работ с мощностями и их сбалансированность в системе локальных мощностей комплексного потока объекта;

— интегрированная оценка качества сбалансированности параметров динамики ресурсов включает технико-экономические показатели и экономические эффекты, принятые в практике нормативов и правил строительного производства.

Понятие критерия равномерности включает модель, отображающую уровень занятости мощности реализации объемов работ, а непрерывности — уровень простоев мощностей из-за неритмичности объемов работ. Сочетание этих критериев составляет вектор оценок качества решений, определяющий уровень результатов ОТР. Применительно к организационным решениям в ПОС вектор оценок отображает уровень колебания использования базовых мощностей и организационных перерывов, а к технологическим решениям в ППР — уровень колебания локальных мощностей и технологических перерывов.

Аналитический комплекс включает модели, методы и инструменты, приведенные ниже.

Логико-информационный модельный комплекс имеет вид:

$$Z(\Delta Z)^o = K_{pb}^o (\Delta O / O_{cp}) \times Z_y(O)^o, \quad (1)$$

$$Z(\Delta T)^o = K_{hp}^o (\Delta T / T_{cp}) \times Z_y(T)^o, \quad (2)$$

$$Z(\Delta Z)^t = K_{pb}^t (\Delta M_b / M_0) \times Z_y(M)^t, \quad (3)$$

$$Z(\Delta Z)^t = K_{hp}^t (\Delta T_b / T_0) \times Z_y(T)^t, \quad (4)$$

$$\text{ИВУ: } < K_{pb}^o, K_{hp}^o, K_{pb}^t, K_{hp}^t >, \quad (5)$$

$$\mathcal{E} = \{(\Sigma Z + \mathcal{E}\mathcal{E}) / \Sigma Z\} > 0, \quad (6)$$

$$\mathcal{E}\mathcal{E} = (A + B + C) > 0, \quad (7)$$

где $Z(\Delta Z)^o$ — изменение затрат объемов работ в сфере организации решений;

K_{pb}^o — критерий качества по равномерности использования ресурсов;

ΔO — изменение объемов работ;

O_{cp} — среднее значение при равномерном использовании объема ресурсов;

$Z_y(O)^o$ — удельные затраты по фактору объемов работ в сфере организации решений;

$Z(\Delta T)^o$ — изменение затрат продолжительности работ в сфере организации решений;

K_{hp}^o — критерий качества по непрерывности использования ресурсов;

ΔT — изменение продолжительности работ;

T_{cp} — среднее значение при равномерной продолжительности использования ресурсов;

$Z_y(T)^o$ — удельные затраты по фактору продолжительности работ в сфере организации решений;

ΔM_b — изменение вспомогательных мощностей потенциала;

M_0 — базовая мощность потенциала;

$Z_y(M)^t$ — удельные затраты по фактору мощностей потенциала в сфере технологии решений;

ИВУ — интегрированный вектор управления;

\mathcal{E} — эффективность адаптивного управления;

$\mathcal{E}\mathcal{E}$ — экономический эффект адаптивного управления;

A, B, C — соответственно экономические эффекты от сетевой оптимизации ПОС и ППР, от оптимизации нормативного и реализуемого ППО.

Методы адаптивного управления предусматривают оптимизацию модельного комплекса потоков работ организационных решений и механизмов — в технологии процессов (1)–(4), методов статистической группировки аналитического вектора показателей качества ОТР (5) и методов ситуационного управления на основе корректировки критериев качества ОТР (6), (7).

Инструментами управления являются критерии равномерности, отображающие уровень занятости мощности в реализации объемов работ, а непрерывности — уровень использования мощностей потенциала органи-

зации из-за разноритмичности объемов работ. Сочетание этих критериев составляет вектор качества решений, определяющий уровень результатов решения ОТР.

Методы решения:

- статистические — для формирования базы данных информационного пространства факторов;
- имитационные — для формирования пространства состояний вариантов потенциала организации;
- сетевые — для формирования ресурсного потока объекта и мощностей ОТР;
- знаниевые — для формирования базы знаний исполнителей по осуществлению эффективных преобразований в среде изменяемых параметров предметной области, включающей объекты, производство, управление.

Алгоритм решения задач адаптивного управления включает:

- разработку параметров организации и технологии процессов с оценкой уровней качества ОТР;
- формирование сетевой архитектуры потоков и процессов с идентификацией матрицы «критерии качества — затраты» проекта объекта;
- оптимизацию сетевой архитектуры по критериям минимизации затрат и повышение уровня критериев качества;
- оптимизацию сетевой архитектуры в процессе реализации проекта объекта.

Выполненные расчеты на примере проектов строительства жилых домов г. Новосибирска позволили установить количественные оценки оптимизации параметров, определяющих эффективность ОТР (см. таблицу).

Согласно приведенной таблице:

- качество ОТР проекта является отображением внутренних особенностей объемно-конструктивных решений объекта и возможности их реализаций строительным потенциалом;
- эффективность ОТР определяет нормативный уровень расчетного состояния и использования ресурсов, которые формируют себестоимость продукции и цену объекта строительной организации;

Влияние факторов ОТР на эффективность адаптивного подхода при реализации проектов жилых объектов

Оценка качества	РПР	ОПР	ОСР	+ Δ 10 ОСР	+ Δ 15 ОСР	+ Δ 20 ОСР
$K_o(f(K_{pb}^o, K_{hp}^o))$	0,74	0,76	0,78	0,73	0,72	0,69
$K_t(f(K_{pb}^t, K_{hp}^t))$	0,81	0,82	0,84	0,79	0,77	0,75
$K_{ot}(f(K_o, K_t))$	0,75	0,76	0,81	0,78	0,75	0,72
$\varTheta_{ot}(f(K_o, K_t))$	0,74	0,75	0,79	0,74	0,71	0,68

Примечания: РПР — расчетное проектное значение ОТР; ОПР — оптимизационное проектное решение; ОСР — оптимизационное строительное ОТР; +Δ10ОСР — доля снижения значения — 10 %, K_o — критерий организованности решений, K_t — критерий технологичности решений, K_{ot} — критерий ОТР, \varTheta_{ot} — эффективность ОТР.

- учет факторов внешней среды предопределяет необходимость перепроектирования сетевой структуры объекта в единой системотехнической модели трех документов — ПОС, ППР, ППО;
- использование адаптивного подхода позволяет минимизировать производственные потери потенциала;
- полученные данные могут быть использованы в качестве базы нормативов по обоснованию реальных затрат строительства на всем жизненном цикле проектирования и строительства объектов.

Разработка информационной технологии должна быть направлена на формирование автоматизированного комплекса сетевых моделей, которым должны решаться задачи: нормализации параметров проектных решений на основе теоретических нормативов и критериев качества; корректировки проектных решений под фактические возможности потенциала организации с максимизацией значений критериев качества; управление по критериям качества решений с учетом изменяемых факторов внешней среды; управления знаниями в сфере проектного менеджмента.

Выводы. 1. Проектные документы строительных объектов, включающие ОТР, не сопровождаются документами по управлению их реализацией в условиях изменяемых факторов рыночной среды.

2. Методы оценок проектных решений не отображают специфику потенциала реализующей организации, что приводит к повышению проектных затрат и как следствие цен на строительный объект.

3. Методический подход для решения этой задачи должен включать комплекс параметров, показателей и алгоритмов адаптивного управления отклонениями проекта на основе динамической оптимизации параметров ОТР, регламентируемых стандартами проектирования.

4. Использование адаптивного подхода регламентирует необходимость разработки автоматизации проектирования параметрической структуры объемов, мощностей строительного потенциала, что обеспечивает снижение непроизводительных затрат строительной продукции и в целом повышение эффективности деятельности организации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов [Текст]. — М. : Госстрой РФ, 1999. — 623 с.
2. Герасимов, В.В. Управление безопасностью социально-экономических систем [Текст] / В.В. Герасимов, Е.С. Лабутин, Н.В. Пятых // Новые технологии в строительном материаловедении. — Новосибирск : НГАСУ, 2012. — С. 161–166.
3. Герасимов, В.В. Управление программными рисками территориальных систем [Текст] / В.В. Герасимов, Е.А. Саломатин, Н.В. Пятых // Новые технологии в строительном материаловедении. — Новосибирск : НГАСУ, 2012. — С. 156–161.

*ГЕРАСИМОВ Виталий Владимирович, д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

*КОРОБОВА Ольга Александровна, д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

ЩЕПОТИН Георгий Константинович, д-р техн. наук, проф.

**Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)**

МИХАЛЬЧЕНКО Олег Юрьевич, канд. техн. наук, проф.

**Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)**

Получено 13.11.13

Gerasimov Vitaly Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Korobova Olga Alexandrovna, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Shchepotin Georgy Konstantinovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Mikhalkchenko Oleg Yurievich, candidate of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

EFFICIENCY OF SYSTEMS ENGINEERING ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS OF CONSTRUCTION OF OBJECTS

The methodical approach to the design of construction projects on the basis of a systematic interaction of technical parameters of the structure , processes and mechanisms for optimizing the parameters of the PIC and CPD assessment of organizational and technological efficiency of design solutions .

Key words: systems engineering, organizational and technological solutions, building, object, method, efficiency.

REFERENCES

1. Guidelines for evaluation of investment projects [Text]. — M. : Russian Gosstroy, 1999. — 623 p.
2. Gerasimov, V.V. Security management of socio-economic systems [Text] / V.V. Gerasimov, E.S. Labutin, N.V. Pyatykh // New technologies in building materials. — Novosibirsk : NSUACE, 2012. — P. 161–166.
3. Gerasimov, V.V. Risk management software territorial systems [Text] / V.V. Gerasimov, E.A. Salomatin, N.V. Pyatykh // New technologies in building materials. — Novosibirsk : NSUACE, 2012. — P. 156–161.

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 627.8.001.42

Л.Ф. ДЗЮБЕНКО, Ю.А. КУЗНЕЦОВА, В.А. СОКОЛОВА, В.М. ТОПОРОВ

МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Рассматриваются вопросы анализа безопасности гидротехнических сооружений, находящихся в длительной эксплуатации. Приводятся некоторые результаты многофакторного анализа состояния гидротехнических сооружений водохранилища питьевого водоснабжения.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, длительный срок эксплуатации, анализ состояния.

Современным законодательством о техническом регулировании, в частности федеральным законом «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [1], предусматривается процедура установления соответствия безопасности зданий и сооружений требованиям безопасности. Обоснованию надежности и безопасности эксплуатируемых гидротехнических сооружений (ГТС) уделяется значительное внимание в современных нормативных документах¹ [2–4], в которых предусматривается проведение расчетов гидравлического, фильтрационного и температурного режимов, а также напряженно-деформированного состояния системы «сооружение — основание» с учетом реальных свойств материалов и пород оснований. При этом для ГТС, находящихся в эксплуатации более 25 лет (независимо от их состояния), предписывается выполнять один раз в пять лет комплексный анализ с оценкой прочности, устойчивости и эксплуатационной надежности. По результатам такого анализа принимается решение о возможности и условиях их дальнейшей эксплуатации или необходимости выполнения капитальных ремонтов, реконструкции сооружений, консервации или ликвидации объекта. В работах^{2,3} приводятся анализ проблем, возникающих при оценке безопасности гидротехнических сооружений водохозяйственных объектов, и некоторые результаты многофакторного анализа эксплуатируемых объектов промышленности.

¹ СТО 70238424.27.140.035–2009. Гидроэлектростанции. Мониторинг и оценка технического состояния гидротехнических сооружений в процессе эксплуатации. Нормы и требования / www.normas.ru

² Дзюбенко Л.Ф., Яненко А.П. О некоторых проблемах при анализе безопасности гидротехнических сооружений неэнергетических объектов // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 1. С. 63–72.

³ Дзюбенко Л.Ф., Кузнецова Ю.А., Сухно А.М., Яненко А.П. Расчет устойчивости ограждающей дамбы хвостохранилища // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 3. С. 28–38.

© Дзюбенко Л.Ф., Кузнецова Ю.А., Соколова В.А., Топоров В.М., 2014

В различных стандартах предприятий и специальной литературе дается неоднозначная трактовка терминов «комплексный анализ» и «многофакторный анализ» (многофакторное исследование ГТС)¹ [4 и др.]. В некоторых стандартах эти термины употребляются как синонимы [4], в других их используют в разных значениях. В рамках данной работы под многофакторным анализом состояния ГТС понимается оценка прочности, устойчивости и эксплуатационной надежности сооружения по результатам многолетних инструментальных и визуальных наблюдений диагностических показателей его работы и поверочным расчетам по действующим нормам проектирования и уточненным расчетным схемам с использованием фактических действующих нагрузок и воздействий, физико-механических характеристик материалов, геометрических размеров, выявленных дефектов и повреждений¹.

Для объекта, являющегося источником водоснабжения двух шахтерских городов Кузбасса, находящегося в эксплуатации 46 лет после строительства II очереди и 20 лет после реконструкции (рис. 1), выполнен комплекс расчетов¹, рекомендованных в [2, 3], с учетом имеющейся фактической информации о сооружениях гидроузла.

Необходимость проведения комплексного анализа связана с декларированием безопасности ГТС, а также рядом проблем, возникших при их эксплуатации. Гидроузел является сооружением II класса [2]. Рассмотрим состав сооружений гидроузла.

Грунтовая плотина — насыпная, однородная из суглинка. Длина по гребню 383 м, максимальная высота 24,1 м, ширина по гребню 6,0 м, ширина по подошве 135,5 м, максимальный напор 15,1 м.

Крепление гребня плотины — асфальтобетонное покрытие толщиной 0,05 м по подготовке из щебня 0,25 м, подстилаемой защитным слоем из песчано-гравийной смеси 0,5 м (отремонтировано в 2013 г.). Крепление верхового откоса — каменная наброска толщиной 0,6 м по защитному слою из песчано-гравийной смеси толщиной 1,2 м. В верхней части откоса толщина каменной наброски увеличивается до 1,0 м. Крепление низового откоса: выше дренажной призмы растительный слой грунта с посевом трав, а затем до гребня отсыпан каменный материал по двухслойному обратному фильтру из щебня и песка. Заложение верхового откоса по проекту 1:4–1:3. Заложение низового откоса по проекту переменное снизу от 1:2 до 1:3, у гребня плотины 1:2,5. В русловой части предусмотрена дренажная каменная призма (банкет) высотой 4,0 м, в пойменной части дренаж не предусмотрен проектом. Вблизи от низового откоса устроена дорожная насыпь для подъезда к насосной станции, в теле которой проложена водопропускная труба диаметром 1000 мм, предусмотренная для отвода профильтровавшейся через тело плотины воды в нижний бьеф. У низового откоса перед дорожной насыпью наблюдается заболачивание.

В основании плотины — суглинки от твердой до текучепластичной консистенции, подстилаемые выветрелыми известняками. Левый борт по стволу плотины представлен массивными кристаллическими и мергелистыми сильно трещиноватыми известняками с повышенной водоносностью; правый борт — аргиллитами, прикрытыми мощным слоем рыхлых отложений. Рыхлые отложения имеют коэффициент фильтрации $0,04 \div 0,007 \text{ м/сут}$.

При строительстве второй очереди гидроузла в основании земляной плотины, в левом борту была выполнена двухрядная цементационная за-

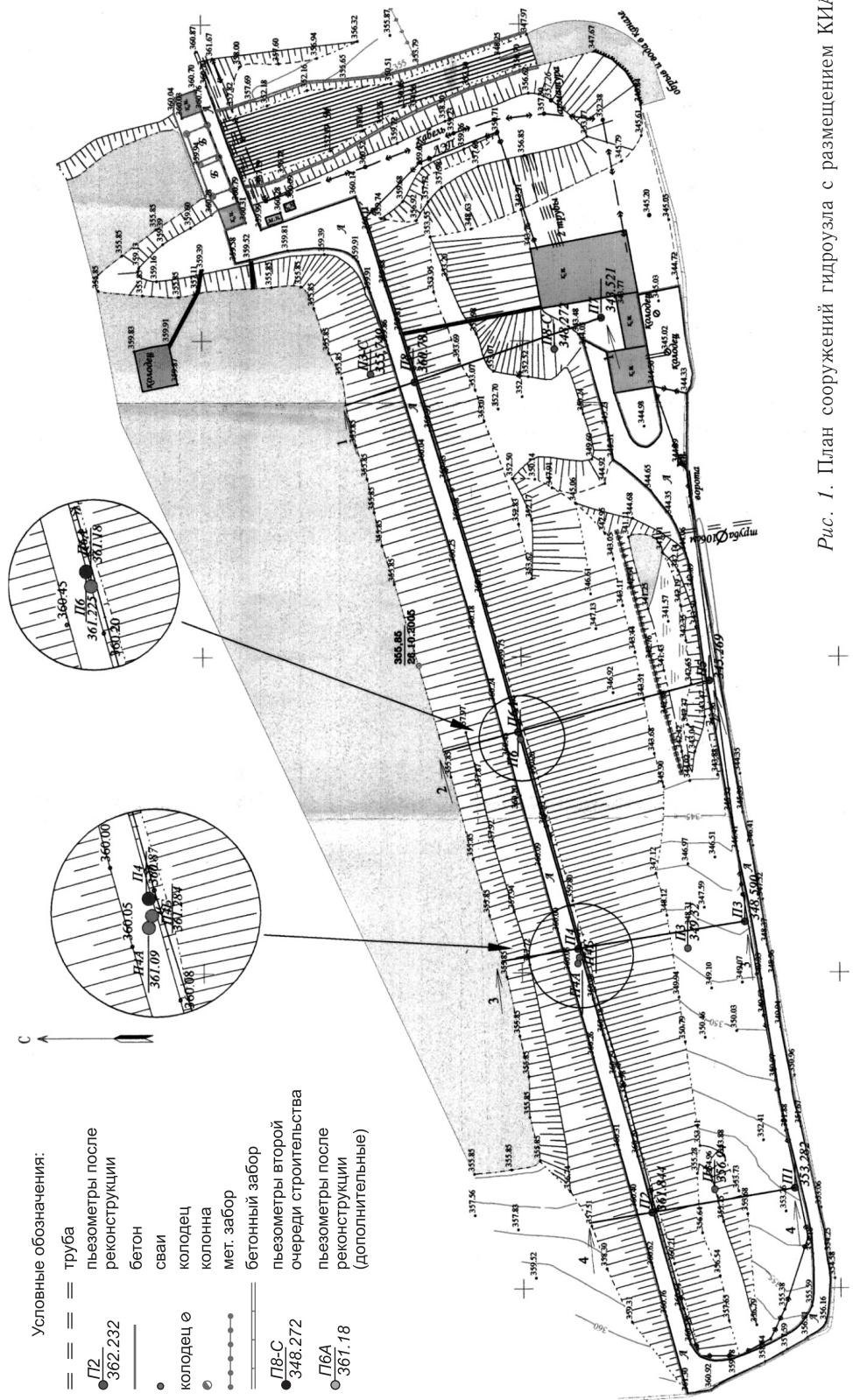


Рис. 1. План сооружений гидроузла с размещением КИА

веса для предотвращения супфозии выветрелых мергелистых известняков и уменьшения потерь на фильтрацию из водохранилища.

Водосброс для пропуска весеннего половодья (паводковый водосброс) — двухпролетный, регулируемый, с сегментными затворами, состоит из подводящего канала, трапецидального водослива, переходной части, быстротока трапецидального сечения с переменным уклоном и консольной части (рис. 2). Водоотводящий тракт имеет сложную конфи-

а)



б)



Рис. 2. Береговой паводковый водосброс
а — вид с нижнего бьефа; б — концевой участок водосброса

гурацию: трапецеидальное сечение с различной шероховатостью, пять участков с различным уклоном, два суживающихся участка, трамплин с разделительными стенками и расщепителями. Водобой также имеет сложную конструкцию: три расширяющихся участка с переменным уклоном, зигзаг, уступ, несимметричность в плане.

Пропускная способность паводкового водосброса по данным проекта при нормальном подпорном уровне (НПУ) — 231,5 м³/с, при форсированном подпорном уровне (ФПУ) (0,1 %) — 350 м³/с. Сопряжение с нижним бьефом — путем отбрасывания струи с уступа. Дальность отлета струи по проекту (расстояние от сооружения до центра воронки размыва) — 16,0 м. Крепление нижнего бьефа на участке сопряжения с паводковым водосбросом — наброска камнем крупностью 350 мм.

Донный водоспуск совмещен с водозабором башенного типа. Водопропускные трубы проложены в железобетонной галерее, длиной 117 м, шириной 6,0 м, высотой 3,0 м. Конструкция галереи усиlena металлической крепью. По длине галереи в местах стыков секций устроены противоволновые фильтрационные диафрагмы. Металлические водопропускные трубы (две нитки) диаметром 1400 и 1600 мм проложены на скользящих опорах. Трубопроводы в башне оборудованы отсекающими задвижками с ручным и электрическим приводом. Водозабор из водохранилища осуществляется через четыре отверстия в башне, оборудованные рыбозащитными устройствами. Вода по двум водоводам подается в насосную станцию 1-го подъема и по этим же водоводам сбрасывается в нижний бьеф (санитарные попуски).

Максимальный расчетный расход донного водоспуска (по проекту) 49 м³/с. Санитарные попуски не менее 0,19 м³/с.

Насосная станция 1-го подъема (суммарная расчетная и максимальная возможная производительность 215 и 260 тыс. м³/сут соответственно). Тип насосной станции — заглубленный.

Водохранилище — русского типа, имеет следующие характеристики: полный объем 62,746 млн м³; полезный объем 60,986 млн м³; отметка НПУ — 358,0 м; отметка ФПУ — 359,3 м; отметка уровня мертвого объема (УМО) — 343,5 м; площадь зеркала при НПУ — 8,8 км². Водохранилище имеет вытянутую форму и простирается с северо-запада на юго-восток на 18,1 км, ширина его в самой узкой части достигает 11,0 м, в наиболее широкой 1,2 км; максимальная глубина 19,0 м, средняя глубина 7,4 м; площадь мелководий с глубиной до 2 м — 1,6 км²; протяженность береговой линии 71,3 км. Режим регулирования — срезка волнами половодья.

Гидротехнические сооружения гидроузла оборудованы следующей контрольно-измерительной аппаратурой (КИА):

— водомерная рейка, прикрепленная к стене водозаборной башни; на стене водозаборной башни имеется обозначение уровней, соответствующих НПУ и ФПУ; нуль рейки привязан к опорному реперу;

— для наблюдений за положением (уровнем) депрессионной кривой в теле и основании плотины заложены 11 пьезометров: № 2, 4–8 (пьезометры после реконструкции), № 1а, 3а, 4а, 4б, 6а (дополнительно установленные пьезометры);

— два опорных репера: Р01 — на правом берегу водохранилища, Р02 — на левом берегу по оси плотины.

Контрольные геодезические знаки, предусмотренные проектом реконструкции на плотине, не установлены. В настоящее время наблюдения за осадкой и горизонтальными перемещениями не проводятся. Топографическая съемка проводилась в 2007 г. Схема расположения КИА приведена на рис. 1.

Эксплуатация и контроль состояния ГТС осуществляются специалистами службы эксплуатации гидроузла.

Эксплуатационным персоналом проводятся следующие инструментальные наблюдения:

- за уровнем, химическим составом воды в водохранилище;
- за фильтрационным напором в теле плотины и в основании;
- за расходом сбрасываемой из водохранилища воды;
- контроль забора воды для водоснабжения.

Визуальные наблюдения проводятся:

- за состоянием грунтовой плотины, фильтрационным режимом;
- за состоянием сегментных затворов и водосбросного тракта паводкового водосброса;
- за состоянием галереи донного водоспуска, ограждающих конструкций, трубопроводов, задвижек.

Результаты наблюдений фиксируются в соответствующих журналах установленной формы.

Анализ данных наблюдений за период, предшествующий декларированию (с 2007 г.), выявил следующие недостатки системы контроля, в первую очередь за грунтовой плотиной как наиболее «проблемным» объектом.

По результатам замеров уровней в пьезометрах установлено, что в пьезометрах № 2, 4б, 6, 6а, 8, расположенных в теле плотины (см. рис. 1), наблюдаются уровни, превышающие уровни воды в водохранилище. В теле грунтовой плотины для контроля кривой депрессии в измерительных створах расположено по одному пьезометру. Пьезометры № 1, 3, 5, 7, 8 установлены в основании плотины на достаточном удалении от низового откоса и контролируют пьезометрический напор в основании. Определить достоверно положение депрессионной поверхности по одному пьезометру в створе невозможно. Инструментальные наблюдения за фильтрационным расходом не проводятся, мерный водослив не установлен.

Количество установленной КИА не соответствует проекту реконструкции. Объем наблюдений за состоянием ГТС и оснащение ГТС КИА недостаточно для II класса [3].

Одной из задач многофакторного анализа на рассматриваемом гидроузле является уточнение критериев безопасности сооружений с использованием современных данных по геологии, исполнительной съемки, уточнения гидрологической, климатической информации, сейсмических условий, данных мониторинга безопасности. Первый этап многофакторного анализа — уточнение состава диагностических показателей состоя-

ния ГТС, затем разработка и уточнение критериальных значений диагностических показателей на основе проведения расчетов.

Учитывая изменения нормативной базы в области проектирования ГТС за 20 лет, прошедших после реконструкции ГТС, была уточнена отметка гребня плотины с учетом возникновения гравитационной волны при сейсмическом воздействии. Для определения волновых характеристик потребовалось определить параметры ветрового воздействия по волноопасному направлению (в проекте использовалось максимальное значение скорости ветра без указания его направления). Анализ данных наблюдений за скорость ветра в районе расположения гидроузла по восьми срокам в течение всего периода наблюдений позволил построить кривую обеспеченности ветра по волноопасному направлению и определить расчетную скорость ветра 2 и 20 % обеспеченностей [3]. Результаты расчетов отметки гребня плотины при возникновении гравитационной волны в водохранилище с использованием уточненных данных по ветру показали недостаточность ее превышения над отметкой ФПУ на 0,5 м.

Фильтрационные расчеты грунтовой плотины при фактических геометрических размерах показали достаточно высокое положение депрессионной поверхности, ее близкий подход к низовому откосу на участке значительно выше гребня дренажного банкета. Однородная плотина отсыпана из суглинистого грунта, который при геологических изысканиях признан «практически» водонепроницаемым. Положение верха суглинистой части плотины оказалось ниже ФПУ, что приводит (при повышении уровня воды выше НПУ) к переливу воды по слою, защищающему гребень от промерзания. Таким образом, конструкция верхней части плотины изначально не обеспечивала проектный режим наполнения водохранилища.

Используя данные инженерно-геологических изысканий, выполненных на стадиях обоснования проекта (1989 г.) и эксплуатации (2006 г.), исполнительную съемку (2007 г.), выполнены расчеты устойчивости низового откоса плотины. Расчеты показали, что для реального профиля плотины устойчивость низового откоса не обеспечивается при использовании физико-механических характеристик грунта по данным изысканий 1989 г. даже без учета сейсмичности и удовлетворяет нормативным требованиям — при использовании данных 2006 г. При сравнительном анализе данных инженерно-геологических изысканий оказалось, что причиной столь различных результатов является сцепление грунта, значение которого существенно превышает нормативные величины для глины.

Следующим объектом многофакторного анализа является паводковый водосброс. Попытка уточнения расчетных расходов в створе гидроузла не увенчалась успехом, так как гидрологический пост, по которому имелся ряд наблюдений, после строительства гидроузла оказался в нижнем бьефе в зоне зарегулированных расходов, а затем был закрыт. Условия формирования стока на водосборной площади водохранилища за период эксплуатации гидроузла, как показал анализ гидрологических данных для рек данного района, существенно не изменились. Наиболь-

ший интерес вызывает определение фактической пропускной способности паводкового водосброса и режима сопряжения бьефов. Сложная конфигурация водопроводящей части водосброса, наличие участков с различной шероховатостью, конструктивных мероприятий по снижению волнообразования потребовали тщательных расчетов условий прохождения расчетных расходов с учетом различных конструктивных особенностей.

Расчеты показали, что пропуск расчетного расхода 0,1 % обеспеченности при существующем объеме водозабора, проектном режиме работы донного водоспуска требует форсировки уровня воды в водохранилище выше проектного значения.

Условия сопряжения бьефов также оказались неблагоприятными, так как расчетные параметры сопряжения: глубина ямы размыва, расположение воронки размыва по отношению к концевой части водобоя, глубина зуба водобоя — превышают проектные.

Сегментные затворы паводкового водосброса и их подъемные механизмы находятся в удовлетворительном состоянии.

Пропускная способность донного водоспуска обеспечивается. Состояние водозaborных трубопроводов удовлетворительное, имеются незначительные протечки через задвижки.

Выполненные расчеты позволяют сделать вывод о необходимости реконструкции гидротехнических сооружений гидроузла. На период разработки проекта реконструкции, прохождения его государственной экспертизы необходимо разработать комплекс мероприятий по обеспечению его безаварийной эксплуатации.

В комплекс мероприятий должно входить выполнение следующих работ: ограничение режима эксплуатации водохранилища, проведение современных инженерно-геологических изысканий, уточнение физико-механических и фильтрационных характеристик грунтов тела плотины и ее основания, а также грунтов береговых склонов, выполнение расчетов фильтрации в обход сооружений, исследование прочностных свойств бетона водосбросных сооружений, проведение мониторинга безопасности ГТС.

Основные решения по реконструкции гидроузла должны включать:

— *по грунтовой плотине*: повышение отметки гребня плотины, исключающей перелив через гребень при сейсмическом воздействии; повышение отметки водонепроницаемой части плотины, обеспечивающей превышение ее над ФПУ не менее чем на 0,5 м [2], для чего необходимо открыть по гребню плотины траншею, заполнить ее водонепроницаемым грунтом проектной плотности и обеспечить наличие защитного слоя из песчано-гравийных грунтов толщиной не менее глубины промерзания; устройство насыпного дренажа, обеспечивающего непромерзание и отвод фильтрационных вод при самом высоком положении депрессионной поверхности, устройство отводящего канала от дренажной призмы, проектирование водопропускной трубы через дорожную насыпь к насосной станции на более низкой отметке; устройство дренажной канавы, заполненной щебнем, в пойменной части плотины, уплотнение низового откоса плотины или крепление низового откоса камнем по обратному фильтру

с предварительным снятием растительного слоя; устройство нагорной канавы в правом береговом примыкании и водоотводящего лотка в левом, организация отвода поверхностных вод с гребня плотины; ревизия и ремонт существующих и устройство новых пьезометров (не менее трех в каждом створе), установка мерного водослива для контроля расхода дренажных вод;

— по береговому водосбросу: ремонт лотка паводкового водосброса (затирка и ожелезнение поверхности), крепление ямы размыва, ревизия и ремонт сегментных затворов, их пазовых конструкций;

— по донному водоспуску: устранения протечек через задвижки, ремонт деформационных швов.

Таким образом, выполненный анализ состояния гидротехнических сооружений позволяет обосновать необходимость реконструкции гидроузла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральный закон № 384 от 30.12.2009 (в ред. федерального закона от 02.07.2013 №185-ФЗ). Нормы и требования / www.normas.ru
2. СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения (Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003). — М., 2012.
3. СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов (Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84*). — М., 2012.
4. СТО 17230282.27.140.003-2008. Гидротехнические сооружения ГЭС и ГАЭС. Организация эксплуатации ТО. Нормы и требования / www.normas.ru

*ДЗЮБЕНКО Любовь Федоровна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: ludzju@yandex.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*КУЗНЕЦОВА Юлия Анатольевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: kuznecovaj.2010@yandex.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

*СОКОЛОВА Валентина Андреевна, доц.; E-mail: ngasu_gts@mail.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

ТОПОРОВ Владимир Михайлович, канд. геогр. наук, заведующий лабораторией гидрологических исследований ФГБУ «СибНИГМИ»

Получено 11.11.13

Dzjubenko Lubov Fedorovna, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: ludzju@yandex.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Kuznetsova Yuliya Anatolevna, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: kuznecovaj.2010@yandex.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Sokolova Valentina Andreevna, assistant professor; E-mail: ngasu_gts@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Toporov Vladimir Michailovich, candidate of the geography sciences, Head of Laboratory of hydrological research FGBU «SibNIGMI», Russia

MULTIVARIATE STATE ANALYSIS OF THE EXPLOITED HYDROTECHNICAL CONSTRUCTIONS

The article describes the questions of safety analysis of hydraulic structures that are in a long-term operation. Some results of multifactorial analysis of the hydraulic structures reservoir drinking water supply.

Key words: hydrotechnical constructions, long exploitation life, state analysis.

REFERENCES

1. Federal law N 384 from 30.12.2009 (in edition of the federal law from 12.07.2013 N 185-FL). Norms and requirements / www.normas.ru
 2. SP 58.13330.2012. Hydrotechnical constructions. The basic provisions. (Updated edition SNIP 33-01-2003). — M., 2012.
 3. SP 39.13330.2012. Earth dams. (Updated edition SNIP 2.06.05-84*). — M., 2012.
 4. SRT 17230282.27.140.003-2008. Hydrotechnical constructions and pumped storages. Organization of operation, maintenance. Norms / www.normas.ru
-

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 628.5:533.6

И.Н. ЛОГАЧЕВ, К.И. ЛОГАЧЕВ, О.А. АВЕРКОВА

ЭЖЕКЦИЯ ВОЗДУХА ПРИ ПЕРЕГРУЗКАХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ КАНАЛАХ С КОВШАМИ*

Сообщение 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ^{1, 2}

Рассмотрен процесс эжектирования воздуха в нориях с позиции классических законов изменения массы воздуха и количества движения. Получена система дифференциальных уравнений, описывающих процесс продольных осредненных течений воздуха в кожухе при совместном размещении в нем рабочей и холостой ветвей нории. Выявлены закономерности изменения эжекционного напора, создаваемого лентой конвейера ковшами и просыпью частиц. Определены механизм перетекания, скорости и расходы воздушных течений в кожухах норий.

Ключевые слова: аспирация, перегрузки сыпучих материалов, эжекция воздуха.

Найдем теперь расход воздуха в кожухе груженой ветви нории. Для этого запишем уравнение динамики воздуха в этом кожухе под действием разности давлений $\Delta p = p_n - p_k$ и эжекционного напора, создаваемого конвейерной лентой гружеными ковшами, учитывая, что скорость воздуха u_1 при значительных разностях давлений может принимать отрицательное значение. Уравнение динамики для воздушного потока в этом кожухе запишется в виде² (см. сообщ. 2):

$$M_1 |1 - \varphi_1| (1 - \varphi_1) - h_a = \sum \zeta_1 \varphi_1 |\varphi_1|$$

или

$$t_1 = |1 - \varphi_1| (1 - \varphi_1) - g_1 \varphi_1 |\varphi_1|, \quad (47)$$

$$\text{где } t_1 = \frac{h_a}{M_1}; \quad g_1 = \frac{\sum \zeta_1}{M_1}.$$

* Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект №14-08-31069-мол_а), плана стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова.

¹ См.: Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А. Эжекция воздуха при перегрузках сыпучих материалов в вертикальных каналах с ковшами. Сообщение 1. Закономерности изменения эжекционного напора в желобах // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 9. С. 53–63.

² См.: Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А. Эжекция воздуха при перегрузках сыпучих материалов в вертикальных каналах с ковшами. Сообщение 2. Эжектирующие свойства ленточного ковшового элеватора // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 10. С. 38–47.

Следует иметь в виду, что при перемене направления движения потока воздуха в кожухе элеватора величины $\sum \zeta_1$ и $\sum \zeta_2$ в общем случае также изменяются — $\sum \zeta_1 \uparrow \neq \sum \zeta_1 \downarrow$; $\sum \zeta_2 \downarrow \neq \sum \zeta_2 \uparrow$ (стрелками показано направление движения воздуха вниз (\downarrow) и вверх (\uparrow)).

Раскрывая знаки абсолютных величин, уравнение (47) распадается на три:

$$t_1 = (1 - \varphi_1)^2 + g_1 \varphi_1^2 \quad \text{при } -\infty < \varphi_1 \leq 0;$$

$$t_1 = (1 - \varphi_1)^2 - g_1 \varphi_1^2 \quad \text{при } 1 \geq \varphi_1 \geq 0;$$

$$t_1 = -(1 - \varphi_1)^2 - g_1 \varphi_1^2 \quad \text{при } +\infty > \varphi_1 \geq 1.$$

Первое из этих уравнений описывает равновесие безразмерных сил при нисходящем (сверху вниз) течении воздуха, которое возникает за счет значительной величины располагаемой разности статистических давлений ($\Delta p = p_n - p_k$). Эжекционный напор ленты с ковшами снижает расход воздуха, являясь дополнительным сопротивлением нисходящему потоку. В случае, когда располагаемая разность давлений мала (второе и третье уравнения), происходит восходящее течение воздуха (снизу вверх), которому противодействует не только аэродинамическое сопротивление стенок кожуха движению воздуха, но и разность давлений Δp .

График однозначной функции $\varphi_1 = f(t_1)$ представляет собой совокупность дуг трех парабол³ (рис. 6):

$$y_1 \equiv t_1 = (1 + g_1) \varphi_1^2 - 2\varphi_1 + 1 \quad \text{при } -\infty < \varphi_1 \leq 0;$$

$$y_2 \equiv t_1 = (1 - g_1) \varphi_1^2 - 2\varphi_1 + 1 \quad \text{при } 1 \geq \varphi_1 \geq 0;$$

$$y_3 \equiv t_1 = -(1 + g_1) \varphi_1^2 + 2\varphi_1 - 1 \quad \text{при } +\infty > \varphi_1 \geq 1.$$

Однозначные величины безразмерной скорости движения воздуха φ_1 в кожухе груженой ветви конвейера во всем диапазоне изменения параметра t_1 определяются корнями следующих уравнений:

$$(1 + g_1) \varphi_1^2 - 2\varphi_1 + (1 - t_1) = 0 \quad \text{при } +\infty > t_1 \geq 1;$$

$$(1 - g_1) \varphi_1^2 - 2\varphi_1 + (1 - t_1) = 0 \quad \text{при } -g_1 \leq t_1 \leq 1;$$

$$(1 - g_1) \varphi_1^2 - 2\varphi_1 - (1 + t_1) = 0 \quad \text{при } -\infty < t_1 \leq -g_1,$$

имеем (при $g_1 < 1$):

$$\varphi_1 = \frac{1}{1 + g_1} [1 + \sqrt{1 - (1 + t_1)(1 + g_1)}] \quad \text{при } -\infty \leq t_1 \leq -g_1; \quad (48)$$

$$\varphi_1 = \frac{1}{1 - g_1} [1 - \sqrt{1 + (t_1 - 1)(1 - g_1)}] \quad \text{при } 1 \geq t_1 \geq -g_1; \quad (49)$$

³ На рис. 5, 6 участки парабол вне однозначной функции $t = f(\varphi)$ показаны пунктиром.

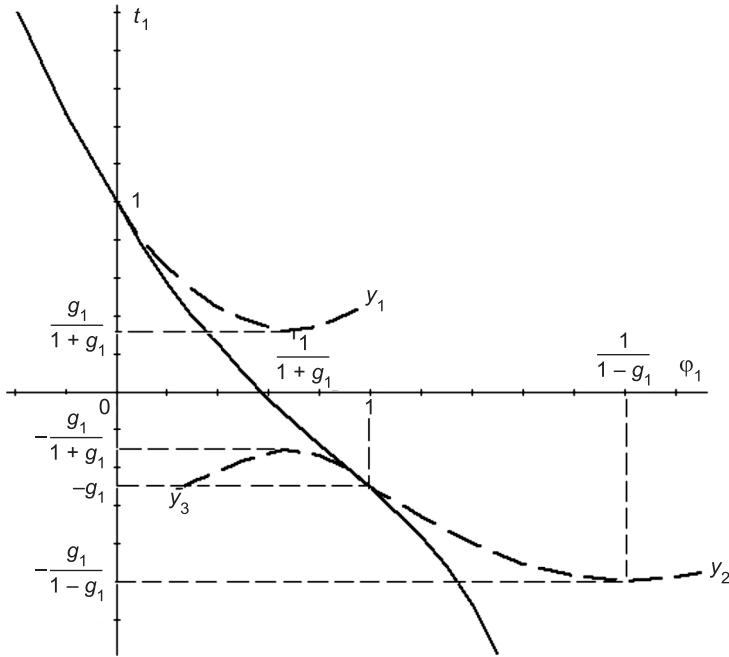


Рис. 6. Изменение относительного расхода воздуха, перетекаемого по кожуху рабочей ветви конвейера элеватора, в зависимости от перепада давлений (сплошная линия — график однозначной функции $\varphi_1 = f(t_1)$)

$$\varphi_1 = \frac{1}{1+g_1} [1 - \sqrt{1 + (t_1 - 1)(1 + g_1)}] \text{ при } \infty > t_1 \geq 1. \quad (50)$$

Как видно из полученных результатов, противоточное движение воздуха в кожухе груженой ветви ленты конвейера ($\varphi_1 < 0$) возможно лишь при большой величине параметра t_1 , т.е. при $t_1 > 1$, $h_k > h_n + M_1 \frac{v_e^2}{2} \rho$.

Предельное значение безразмерной скорости (расхода) воздуха в кожухе рабочей ветви конвейера (при $h_k = h_n$) составляет

$$\lim_{t_1 \rightarrow 0} \varphi_1 = \varphi_{1pr} = \frac{1}{1 + \sqrt{g_1}} \quad (51)$$

и скорость воздуха u_1 достигает скорости ковшей v_e . $\varphi_{1pr} = 1$ при $M_1 \gg \sum \zeta_1$.

При малой разности статических давлений ($t_1 < 1$) перетекание воздуха по кожухам возможно только по прямоточной схеме. По кожухам нории воздух движется в направлении движения ленты конвейера. Причем, как правило, $Q_2 > Q_1$.

Это объясняется влиянием эжектирующей способности потока просыпи при разгрузке сыпучего материала из ковшей в верхней части элеватора и разной величиной коэффициента аэродинамического сопротивления пустого ковша и загруженного ковша. Кроме этого располагаемая

разность давлений в кожухах холостой ветви способствует движению воздуха, а в кожухе груженой ветви препятствует перемещению воздуха. Последнее объясняет тот факт, что при равенстве эжекционных ($M_1 = M_2$) и аэродинамических сил сопротивления ($\Sigma\zeta_1 = \Sigma\zeta_2$) не наступает равенство скоростей (расходов воздуха в кожухах нории (рис. 7))⁴. Разность расходов воздуха в этом случае $Q_2 - Q_1 = (\varphi_2 - \varphi_1)v_e S$ будет либо положительна (при $t = 0$), либо отрицательна (при $t < 0$) и при абсолютной величине будет расти при увеличении параметра t .

В табл. 3, 4 приведены расчетные величины относительных расходов воздуха в кожухах нории. Их величина найдена по формулам (43)–(45) и (48)–(50).

Как видно из этих данных в области малых располагаемых давлений (при $t < 1$) расход восходящего воздуха в кожухе холостой ветви уменьшается как при росте параметра t_2 , так и при уменьшении параметра g_2 . В области больших располагаемых давлений (при $t_2 > g_2$) скорость воздуха $u_2 > v_e$ и эжектирующая способность пустых ковшей оказывает дополнительное сопротивление и поэтому с ростом параметра M_2 при одних и тех же Δp (при падении параметра t_2) относительный расход φ_2 уменьшается.

В кожухе груженой ветви конвейера относительный расход восходящего потока воздуха снижается с ростом Δp и при $t_1 > 1$ возникает нисходящее движение воздуха (отрицательное значение φ_1). При росте M_1 (уменьшение t_1) расход φ_1 уменьшается.

Выводы. 1. При эксплуатации высокопроизводительных норий поток сыпучего материала в загрузочных и разгрузочных желобах характеризуется повышенной объемной концентрацией, достигающей $\beta_y = 0,01$. Эжекция воздуха таким потоком должна оцениваться на основе текущего (соотношение (6)), а не усредненного коэффициента аэродинамического сопротивления ψ_y .

В области значительных объемных концентраций в силу изменения текущего коэффициента ψ за счет уменьшения объемной концентрации

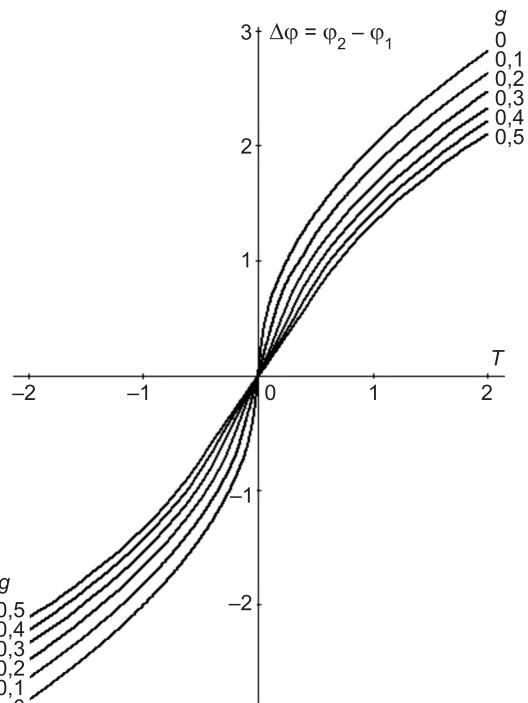


Рис. 7. Изменение относительного расхода воздуха, перетекаемого по кожухам нории (при $t_1 = t_2 = t$, $g_1 = g_2 = g$)

⁴ Как видно из рис. 7 разность расходов может быть равной нулю лишь в крайне редком случае, когда давления в верхнем и нижнем кожухах элеватора одинаковы ($h_n = h_k$).

Таблица 3. Относительный расход воздуха φ_2 в кожухе холостой ветви конвейера нории

$t_2 \setminus g_2$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
-2,0	-0,4142	-0,4083	-0,4027	-0,3974	-0,3923	-0,3874
-1,9	-0,3784	-0,3733	-0,3685	-0,3639	-0,3595	-0,3553
-1,8	-0,3416	-0,3374	-0,3333	-0,3295	-0,3257	-0,3222
-1,7	-0,3036	-0,3004	-0,3971	-0,2939	-0,2908	-0,2879
-1,6	-0,2649	-0,2622	-0,2596	-0,2571	-0,2546	-0,2523
-1,5	-0,2247	-0,2227	-0,2208	-0,2189	-0,2170	-0,2153
-1,4	-0,1832	-0,1818	-0,1805	-0,1791	-0,1779	-0,1766
-1,3	-0,1402	-0,1393	-0,1385	-0,1377	-0,1369	-0,1361
-1,2	-0,0954	-0,0950	-0,0946	-0,0942	-0,0938	-0,0935
-1,1	-0,0488	-0,0487	-0,0486	-0,0485	-0,0484	-0,0483
-1,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-0,9	0,0513	0,0512	0,0510	0,0509	0,0508	0,0506
-0,8	0,1056	0,1050	0,1044	0,1038	0,1032	0,1026
-0,7	0,1633	0,1618	0,1603	0,1588	0,1574	0,1561
-0,6	0,2254	0,2222	0,2192	0,2164	0,2137	0,211
-0,5	0,2929	0,2871	0,2818	0,2768	0,3722	0,2679
-0,4	0,3675	0,3575	0,3486	0,3406	0,3333	0,3267
-0,3	0,4523	0,4352	0,4208	0,4084	0,3974	0,3875
-0,2	0,5528	0,5232	0,5000	0,4810	0,4648	0,4508
-0,1	0,6838	0,6268	0,5886	0,5596	0,5363	0,5168
0	1,000	0,7597	0,6910	0,6461	0,6126	0,5858
0,1	1,3162	1,000	0,8170	0,7435	0,6948	0,6584
0,2	1,4472	1,2240	1,000	0,8511	0,7847	0,7351
0,3	1,5477	1,3451	1,1667	1,000	0,8849	0,8168
0,4	1,6325	1,4392	1,2743	1,1300	1,000	0,9046
0,5	1,7071	1,5189	1,3604	1,2243	1,1055	1,000
0,6	1,7746	1,5894	1,4343	1,3022	1,1881	1,0883
0,7	1,8367	1,6535	1,5000	1,3700	1,2583	1,1611
0,8	1,8944	1,7120	1,5598	1,4309	1,3204	1,2244
0,9	1,9487	1,7667	1,6151	1,4867	1,3767	1,2813
1,0	2,0000	1,8182	1,5667	1,5385	1,4286	1,3333
1,1	2,0488	1,8669	1,7153	1,5869	1,4769	1,3816
1,2	2,0954	1,9132	1,7613	1,6357	1,5224	1,4268
1,3	2,1402	1,9575	1,8052	1,66761	1,5655	1,4694
1,4	2,1832	2,0000	1,8471	1,7176	1,6064	1,5099
1,5	2,2247	2,0409	1,8874	1,7573	1,6456	1,5486
1,6	2,2649	2,0804	1,9262	1,7955	1,6832	1,5856
1,7	2,3038	2,1186	1,9637	1,8323	1,7194	1,6212
1,8	2,3416	2,1556	2,0000	1,8679	1,7543	1,6555
1,9	2,3784	2,1915	2,0354	1,9024	1,7881	1,6886
2	2,4142	2,2265	2,0694	1,9358	1,8209	1,7208

Таблица 4. Относительный расход воздуха ϕ_1 в кожухе груженой ветви конвейера элеватора

$t_1 \setminus g_1$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
-2,0	2,4142	2,2265	2,0694	1,9358	1,8209	1,7208
-1,9	2,3784	2,1915	2,0354	1,9024	1,7881	1,6886
-1,8	2,3416	2,1556	2,0000	1,8679	1,7543	1,6555
-1,7	2,3038	2,1186	1,9637	1,8323	1,7194	1,6212
-1,6	2,2649	2,0804	1,9262	1,7955	1,6832	1,5856
-1,5	2,2247	2,0409	1,8874	1,7573	1,6456	1,5486
-1,4	2,1832	2,0000	1,8471	1,7176	1,6064	1,5099
-1,3	2,1402	1,9575	1,8052	1,6761	1,5655	1,4694
-1,2	2,0954	1,9132	1,7613	1,6357	1,5224	1,4268
-1,1	2,0488	1,8669	1,7153	1,5869	1,4769	1,3816
-1,0	2,0000	1,8182	1,5667	1,5385	1,4286	1,3333
-0,9	1,9487	1,7667	1,6151	1,4867	1,3767	1,2813
-0,8	1,8944	1,7120	1,5598	1,4309	1,3204	1,2244
-0,7	1,8367	1,6532	1,5000	1,3700	1,2583	1,1611
-0,6	1,7746	1,5894	1,4343	1,3022	1,1881	1,0883
-0,5	1,7071	1,5189	1,3604	1,2243	1,1055	1,000
-0,4	1,6325	1,4392	1,2743	1,1300	1,000	0,9046
-0,3	1,5477	1,3451	1,1667	1,000	0,8849	0,8168
-0,2	1,4472	1,2240	1,000	0,8511	0,7847	0,7351
-0,1	1,3162	1,000	0,8170	0,7435	0,6948	0,6584
0	1,000	0,7597	0,6910	0,6461	0,6126	0,5858
0,1	0,6838	0,6268	0,5886	0,5596	0,5363	0,5168
0,2	0,5528	0,5232	0,5000	0,4810	0,4648	0,4508
0,3	0,4523	0,4352	0,4208	0,4084	0,3974	0,3875
0,4	0,3675	0,3775	0,3486	0,3406	0,3333	0,3267
0,5	0,2929	0,2871	0,2818	0,2768	0,3722	0,2679
0,6	0,2254	0,2222	0,2192	0,2164	0,2137	0,2111
0,7	0,1633	0,1618	0,1603	0,1588	0,1574	0,1561
0,8	0,1056	0,1050	0,1044	0,1038	0,1032	0,1026
0,9	0,0513	0,0512	0,0510	0,0509	0,0508	0,0506
1,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,1	-0,0488	-0,0487	-0,0486	-0,0485	-0,0484	-0,0483
1,2	-0,0954	-0,0950	-0,0946	-0,0942	-0,0938	-0,0935
1,3	-0,1402	-0,1393	-0,1385	-0,1377	-0,1369	-0,1361
1,4	-0,1832	-0,1818	-0,1805	-0,1791	-0,1779	-0,1766
1,5	-0,2247	-0,2227	-0,2208	-0,2189	-0,2170	-0,2153
1,6	-0,2649	-0,2622	-0,2596	-0,2571	-0,2546	-0,2523
1,7	-0,3036	-0,3004	-0,3971	-0,2939	-0,2908	-0,2879
1,8	-0,3416	-0,3374	-0,3333	-0,3295	-0,3257	-0,3222
1,9	-0,3784	-0,3733	-0,3685	-0,3639	-0,3595	-0,3553
2	-0,4142	-0,4083	-0,4027	-0,3974	-0,3923	-0,3874

падающих частиц величина эжекционного напора даже в условиях коротких желобов ($l < l_y$) заметно отличается от величины напора p_{ey} , определенного по усредненному коэффициенту ψ_y . При определении расчетных значений эжекционного напора в загрузочном и разгрузочном желобах необходимо вводить поправочный коэффициент K , величина которого заметно отличается от единицы при малых начальных скоростях потока частиц (при $n < 0,5$, см. табл. 2, рис. 1 в сообщ. 1).

Поток частиц в желобах при $B < 0,1$ можно рассматривать как своеобразный нагнетатель с характеристикой, определяемой формулой (11) с учетом полученного коэффициента K_0 . Для потока легких частиц ($d_e \approx 3$ мм) в области $n < 0,5$ и $\beta_y = 0,001$ изменение интенсивности эжекционного напора в силу роста коэффициента аэродинамического сопротивления по высоте падения пренебрежимо мало, поправочный коэффициент можно не учитывать ($K = K_0 = 1$), а величину напора определяем по формуле (4).

2. Направление потока воздуха в кожухе рабочей и холостой ветвей нории формируется за счет аэродинамической силы ковшей и движущейся ленты конвейера, а также за счет эжекционного напора потока просыпи частиц при разгрузке ковшей. В результате действия этих сил в кожухах возникает перепад давления (13), равный сумме эжекционных напоров, создаваемых конвейерной лентой с ковшами E_k (15) и потока просыпи E_p (18) за вычетом аэродинамического сопротивления стенок кожуха (14).

Величина эжекционного напора E_k , создаваемого лентой конвейера ковшами, определяется аэродинамическим коэффициентом c_{ek} (17) (пропорциональным числу ковшей, их лобовым сопротивлениям и площадью миделева сечения), абсолютной величиной и направлением скорости ковшей относительно скорости воздушного потока в кожухе.

Величина эжекционного напора просыпи частиц E_p (19) зависит от коэффициента лобового сопротивления частиц, их размера и расхода, а также от длины кожуха, поперечного сечения кожуха и относительной скорости потока частиц.

3. При размещении рабочей и холостой ветвей ленты конвейера в общем кожухе нории скорость прямоточного движения воздуха изменяется по длине из-за перетекания воздуха через зазоры между ветвями конвейера и стенками кожуха. Перетекание воздуха происходит под действием разности давления кожуха рабочей и холостой ветвей и зависит от аэродинамического сопротивления зазора (20). Направление перетекания воздуха зависит от соотношения между величинами p_v и p_u .

При одинаковом размере кожухов элеватора изменение абсолютных величин продольных скоростей одинаково и зависит от абсолютной величины скоростей перетекания, геометрических размеров зазора и поперечного сечения кожуха. Количество движения продольного течения воздуха в этом случае определяется переменными величинами аэродинамических сил ковшей в силу изменения относительной скорости их движения.

Скорость течения воздуха в кожухах может быть найдена численным интегрированием системы трех безразмерных дифференциальных уравнений (38)–(40).

4. Направление и расход воздушного потока в кожухах нории при отдельном размещении рабочей и холостой ветвей конвейера зависит от соотношения эжекционных напоров и разности статистических давлений в кожухе головки нории и в кожухе ее башмака. Прямоточное движение воздуха (по направлению перемещения ковшей) возникает в кожухе рабочей ветви при преобладании эжекционных сил (при $\Delta\bar{p} < M_1$, $t_1 < 1$ и $\Delta\bar{p} < M_2$), а в кожухе холостой ветви при любой величине эжекционных сил и разности давления (при $\Delta\bar{p} > -M_2$, $t_2 > -1$). Противоточное движение возможно лишь в одном из кожухов — при $\Delta\bar{p} > M_1$ в кожухе рабочей ветви или при $\Delta\bar{p} < -M_2$ в кожухе холостой ветви, во втором кожухе при этом наблюдается прямоточный поток воздуха.

5. Относительные скорости и расходы воздуха в кожухах элеватора зависят от двух параметров t и g (42) и (47), представляющих отношение разности давлений и сопротивления кожухов к эжекционным силам. Однозначные величины φ_1 и φ_2 в широком диапазоне изменения разности давлений ($-\infty < t_1 < \infty$; $-\infty < t_2 < \infty$) можно найти по формулам (48)–(50) и (43)–(45).

При равенстве давлений в верхнем и нижнем кожухах элеватора относительные скорости достигают предельных значений, определенных отношением (51) и (46), и при значительных эжекционных силах ($M_1 \gg \Sigma\zeta_1$ и $M_2 \gg \Sigma\zeta_2$) скорости воздуха становятся равными скорости перемещения ковшей нории.

Абсолютные скорости воздушных потоков в кожухах зависят не только от скорости движения ковшей, но и от разности давлений, от лобового сопротивления ковшей нории и аэродинамического сопротивления кожухов, от величины просыпи частиц.

6. При прямоточной схеме движения расход воздуха в кожухе холостой ветви больше, чем в кожухе рабочей ветви конвейера элеватора. Объясняется это разным направлением эжекционных сил и сил, обусловленных разностью давлений в кожухе рабочей ветви (в кожухе холостой ветви эти силы совпадают, что интенсифицирует процесс эжектирования воздуха, как и дополнительные эжекционные силы, формируемые потоком просыпи частиц при разгрузке ковшей), а также разными величинами коэффициента лобового сопротивления для пустого и груженого ковшей.

При противоточных схемах перемещения воздуха эжекционные силы ковшей являются дополнительными аэродинамическими сопротивлениями и поэтому абсолютная величина расхода восходящего потока воздуха в кожухе холостой ветви, как и расхода нисходящего потока воздуха в кожухе рабочей ветви, возрастает в меньшей степени, чем при прямотоке (табл. 3, 4).

ЛОГАЧЕВ Иван Николаевич, д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ЛОГАЧЕВ Константин Иванович, д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

АВЕРКОВА Ольга Александровна, канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Logachev Ivan Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Logachev Konstantin Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Averkova Olga Alexandrovna, candidate of technical sciences, assistant professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

THE EJECTION OF AIR DURING OVERLOADS OF GRANULAR MATERIALS IN A VERTICAL CHANNELS WITH LADLES

M e s s a g e 3. DISCUSSION OF RESEARCH RESULTS

We have considered the process of injecting air in norias from the position of classical laws of changing air mass and momentum. We obtained a system of differential equations describing the process of longitudinal averaged flows of air in the cover with sharing work and idle branches of noria in it. We identified patterns of change of an ejection pressure generated by the conveyor belt and alluvial particles. We have determined mechanism of flows, speed and consumption of air currents in the covers of norias.

Key words: aspiration, bulk material transfer, air suction.