

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 (685)
Январь 2016 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.А. Воробьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.
В.А. Игнатьев, д-р техн. наук, проф.
В.И. Костин, д-р техн. наук, проф. (зам. гл. редактора)
Г.Б. Лебедев, канд. техн. наук, доц. (зам. гл. редактора)
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. Правдинец, 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 25.01.16. Формат 70×108 1/16
Усл. печ. л. 9,98+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 610

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Царенко С.Н. Продольно-поперечный изгиб стержней переменной жесткости 5

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Рахимова Н.Р., Рахи-
мов Р.З. Влияние хими-
ко-минералогического со-
става добавок известняка на свойства композицион-
ного шлакощелочного вя-
жущего 14

Низина Т.А., Инин А.Е.,
Неверов В.А. Влияние обжига диатомита на теп-
лофизические характери-
стики жидких теплоизо-
ляционных покрытий 24

Панова В.Ф., Панов С.А.,
Карпачева А.А. Систем-
ный подход при использо-
вании вторичных мине-
ральных ресурсов в про-
изводстве строительных
материалов 31

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Файзиев Х., Бабакаев С.Н.,
Норматов М.У. Числен-
ное решение краевой за-
дачи неустановившейся
фильтрации в грунтовых
плотинах методом ко-
нечных разностей 43

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

Осипов Е.Н., Шацкий В.П., Спирина Н.Г. К вопросу о перераспределении потоков воздуха в пластинчатых водоиспарительных охладителях рекуперативного принципа действия	51
Кузнецова Н.В., Щербаков В.И., Щукина Т.В. Проектирование биогазовых установок для утилизации органических отходов	58
Гальперин Е.М. Надежность и нормы проектирования кольцевой водопроводной сети	65

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

Дмитриев М.П., Абраменков Д.Э., Гвоздев В.А., Абраменков Э.А. Пневматический ударный механизм молота с распределительной камерой, камерой форсажа и камерой торможения и его физико-математическое описание	74
--	----

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

Бежанова М.В., Вольская Л.Н. Основные принципы формирования и организации архитектурных ансамблей в крупных городах Сибири	84
---	----

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Высоцкий Л.И. Эффективное использование новой модели строения турбулентных продольно-однородных потоков при анализе их параметров. Часть I	90
Матус Е.П., Дорф В.А., Красновский Р.О., Капустин Д.Е. Неразрушающий контроль распределения волокон фибры в тонкостенных стальфибробетонных конструкциях	98

В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

Рудзей Г.Ф., Адегова Л.А., Дубинин В.В. Расчет усталостной долговечности образцов с различными видами обработки поверхности при действии коррозионной среды	105
--	-----

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

No 1 (685)

January 2016

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

Editorial Board:

A.A. Afanasyev, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS
V.A. Vorobiov, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS
V.A. Ignatyev, DSc (Eng), Prof.
V.I. Kostin, DSc (Eng), Prof. (Deputy Editor-in-Chief)
G.B. Lebedev, PhD, Ass. Prof. (Deputy Editor- in-Chief)
L.S. Lyakhovich, DSc (Eng), Prof., Acad. RAACS
V.I. Morozov, DSc (Eng), Prof.
Yu.P. Panibratov, DSc (Econ), Prof., Acad. RAACS
Yu.P. Pravdivets, 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 STRUCTURES

Tsarenko S.N. Longitudinal-transverse bending of variable stiffness rods 5

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. Influence of chemical-mineralogical composition of limestone addition on the properties of the blended alkali-activated slag cements 14

Nizina T.A., Inin A.E., Neverov V.A. Influence of diatomite firing on thermophysical characteristics of liquid thermal insulation coatings 24

Panova V.F., Panov S.A., Karpacheva A.A. Systematic approach when using secondary mineral resources in production building materials 31

HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Fayziev Kh., Babakaev S.N., Normatov M.U. Numerical solution of the problem of unsteady filtration in earth dams finite difference method 43

SANITARY ENGINEERING	
Osipov E.N., Shatskiy V.P., Spirina N.G. To the question of the redistribution of air flow in evaporative coolers recuperative	51
Kuznetsova N.V., Shcherbakov V.I., Shchukina T.V. Design of biogas plants for recycling of organic waste	58
Gal'perin E.M. Reliability and design standards ring water network	65
BUILDING AND ROAD MACHINES	
Dmitriev M.P., Abramakov D.E., Gvozdev V.A., Abramakov E.A. Air percussion mechanism of hummer with the distributive chamber, forsing chamber and breaking chamber and its physico-mathematical description	74
SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND ECOLOGY	
Bezhanova M.V., Vol'skaya L.N. Basic principles of creation and development of architectural ensembles in the large cities of Siberia	84
SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION	
Vysotskiy L.I. Efficient use a new model of turbulent structure of a longitudinally-uniform flow when analyzing their parameters. Part I	90
Matus E.P., Dorf V.A., Krasnovskiy R.O., Kapustin D.E. Nondestructive control of fibers distribution in steel fiber concrete thin slab structures	98
IN HIGHER SCHOOL LABS	
Rudzey G.F., Adegová L.A., Dubinin V.V. Calculation fatigue life of samples with different surface treatment under the effect of a corrosive environment	105

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 539.3:624.04

С.Н. ЦАРЕНКО

ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНЫЙ ИЗГИБ СТЕРЖНЕЙ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ

Исследуется напряженно-деформированное состояние стержней, изгибная жесткость которых изменяется по степенной зависимости. В качестве математической модели рассматривается дифференциальное уравнение продольно-поперечного изгиба стержня. Решение уравнения получено в аналитическом виде с использованием функций Бесселя и Ломмеля. Для нахождения произвольных постоянных используется метод начальных параметров. В качестве примера рассмотрен продольно-поперечный изгиб консольных конструкций с разными геометрическими параметрами под действием распределенной нагрузки постоянной интенсивности. Исследовано влияние продольной нагрузки на значения максимального прогиба и изгибающего момента в безразмерных величинах.

Ключевые слова: стержень переменной жесткости, продольно-поперечный изгиб, поперечное перемещение, устойчивость, функции Бесселя, функция Ломмеля.

Математическая модель упругого стержня широко применяется в теории расчета инженерных конструкций и сооружений, например, в статьях [1, 2] исследуется устойчивость бурильных колон и обсадных труб как весомого растянуто-сжатого стержня, а в работах [3, 4] для моделирования динамических процессов в конструкциях башенного типа используются стержни неоднородной структуры. В зависимости от сочетания нагрузок, действующих на конструкции, и от характера их работы используют разные математические модели, описывающие напряженно-деформированное состояние стержня. В качестве одной из таких рассматривается продольно-поперечный изгиб, а в случае, когда продольная нагрузка действует на сжатие стержня, исследуется проблема устойчивости.

Впервые задача об устойчивости сжатого прямого стержня и в форме усеченного конуса была поставлена и решена Эйлером [5]. Более общие случаи стержней, жесткость которых изменялась по степенным зависимостям, рассмотрены А.Н. Динником [6], однако в своей работе он ограничился рассмотрением консольных конструкций, что позволило исследовать лишь некоторые частные случаи граничных условий. В литературе [7] при решении задачи устойчивости стержня переменной жесткости использован численный метод расчета на основе аппроксимации формы стержней с непрерывно изменяющейся жесткостью ступенчатой формой. Влияние разных форм поперечного сечения стержней на величину критической нагрузки исследовано в статье [8]. В рабо-

так [9, 10] рассмотрена устойчивость стержней с произвольно изменяющейся изгибной жесткостью на основе решения уравнения продольного изгиба в виде ряда, построенного с помощью интегральных рекуррентных зависимостей. Предложенное решение можно использовать только для некоторых простых схем, описанных в работе [10], и не подходит, например, при наличии упругих связей. Таким образом, математическая модель, полученная на основе точного решения уравнения продольно-поперечного изгиба стержней переменной жесткости, позволит исследовать проблему устойчивости для более общих случаев закреплений стержня, а также учесть влияние продольной нагрузки на величину изгибающих моментов, перерезывающих сил и поперечных перемещений.

Для разнообразного класса конструкций (решетчатые башни, стержни и трубы разных очертаний) изгибная жесткость описывается степенной зависимостью от продольной координаты x :

$$EJ = EJ_2 z^m; \quad z = (1-k) \frac{x}{l} + k; \quad k = \frac{h_1}{h_2}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости;

J_2 – момент инерции основания стержня;

h_1 и h_2 – радиусы инерции верхнего и нижнего сечений;

l – длина стержня (рис. 1); показатель степени m определяется геометрией конструкции для известных моделей, примеры которых рассмотрены в работе [6], m – число натуральное.

Из условий равновесия элемента такого стержня следует система уравнений

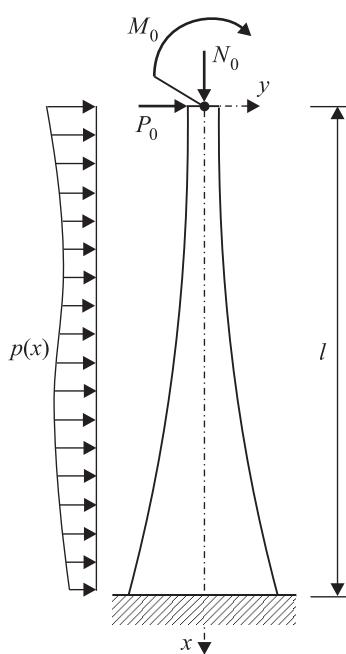


Рис. 1. Расчетная схема стержня с непрерывно изменяемой жесткостью

$$\begin{aligned} EJ(x) \frac{d^2 f}{dx^2} &= M(x), \\ \frac{dM}{dx} &= Q_y(x) - N_x \frac{df}{dx}, \quad \frac{dQ_y}{dx} = p(x). \end{aligned} \quad (2)$$

Функция $f(x)$ описывает форму изогнутой оси стержня;

$M(x)$ – изгибающий момент;

$Q_y(x)$ – проекция поперечной силы на ось y ;

N_x – проекция продольного усилия на ось x (величина постоянная по длине стержня $N_x = N_0$).

Из системы уравнений (2) приходим к уравнению относительно прогибов $f(x)$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{d}{dx} \left(EJ(x) \frac{d^2 f}{dx^2} \right) + N_x \frac{df}{dx} \right) = p(x). \quad (3)$$

Для уравнения (3), выполнив замену $u = \frac{df}{dx}$ и перейдя к переменной z , интегрируя, получим

$$z^m \frac{d^2 u}{dz^2} + mz^{m-1} \frac{du}{dz} + \frac{N_x l^2}{EJ_2(1-k)^2} u = \frac{l^3}{EJ_2(1-k)^3} \int p(z) dz + \bar{C}_3, \quad (4)$$

где \bar{C}_3 – произвольная постоянная.

При $m=2$ уравнение (4) является уравнением Эйлера. Данный случай продольно-поперечного изгиба для стержней, моделирующих конструкции башенного типа, подробно рассмотрен в работе [11].

В уравнении (4) сделаем замену переменных $\zeta = z^{\frac{1}{2(1-v)}}$, $v = \frac{1-m}{2-m}$, тогда оно примет вид

$$\frac{d^2 u}{d\zeta^2} + \frac{1-2v}{\zeta} \frac{du}{d\zeta} + \lambda^2 u = 4(1-v)^2 \bar{C}_3 + \frac{l^3}{EJ_2} \left(\frac{2(1-v)}{1-k} \right)^3 \int \zeta^{1-2v} p(\zeta) d\zeta, \quad (5)$$

$$\text{здесь } \lambda^2 = \frac{4N_x(1-v)^2 l^2}{EJ_2(1-k)^2}.$$

Вначале рассмотрим случай $p(\zeta) \equiv 0$, который актуален для исследования устойчивости стержней с разными схемами закрепления. Уравнению (5) соответствует однородное уравнение, решение которого известно [12], а частным решением неоднородного уравнения, очевидно, является константа. Таким образом, общее решение находится в виде

$$u(\zeta) = C_1 \zeta^v J_v(\lambda \zeta) + C_2 \zeta^v Y_v(\lambda \zeta) + C_3, \quad (6)$$

где J_v , Y_v – функции Бесселя.

Интегрируя по длине, приходим к уравнению прогибов

$$f(\zeta) = \frac{2l(1-v)}{\lambda(1-k)} \left(C_1 \zeta^{1-v} J_{v-1}(\lambda \zeta) + C_2 \zeta^{1-v} Y_{v-1}(\lambda \zeta) + C_3 \frac{\lambda}{2(1-v)} \zeta^{2-2v} + C_4 \right). \quad (7)$$

Введем следующее обозначение для функций:

$$A_{\lambda\zeta} = \frac{\pi}{2} \lambda \zeta_0^{1-v} \zeta^{1-v} (J_{v-1}(\lambda \zeta) Y_{v-1}(\lambda \zeta_0) - Y_{v-1}(\lambda \zeta) J_{v-1}(\lambda \zeta_0));$$

$$B_{\lambda\zeta} = \frac{\pi}{2} \lambda \zeta_0^v \zeta^{1-v} (Y_{v-1}(\lambda \zeta) J_v(\lambda \zeta_0) - J_{v-1}(\lambda \zeta) Y_v(\lambda \zeta_0));$$

$$C_{\lambda\zeta} = \frac{\pi}{2} \lambda \zeta_0^{1-v} \zeta^v (J_v(\lambda \zeta) Y_{v-1}(\lambda \zeta_0) - Y_v(\lambda \zeta) J_{v-1}(\lambda \zeta_0));$$

$$D_{\lambda\zeta} = \frac{\pi}{2} \lambda \zeta_0^v \zeta^v (Y_v(\lambda \zeta) J_v(\lambda \zeta_0) - J_v(\lambda \zeta) Y_v(\lambda \zeta_0)),$$

здесь $\zeta_0 = k^{\frac{1}{2(1-v)}}$ – значение аргумента при $x=0$.

Используя принятые зависимости, произвольные постоянные в уравнении (6) можно выразить через начальные параметры, тогда уравнения

прогибов, углов поворота, изгибающих моментов и поперечных сил примут вид:

$$f(\zeta) = f_0 - u_0 l \frac{2(1-v)}{\lambda(1-k)} A_{\lambda\zeta} + \frac{M_0 l^2}{EJ_2} \left(\frac{2(1-v)}{\lambda(1-k)} \right)^2 (1 - B_{\lambda\zeta}) + \frac{P_0 l^3}{EJ_2} \left(\frac{2(1-v)}{\lambda(1-k)} \right)^3 \left(\frac{\lambda}{2(1-v)} (\zeta^{2-2v} - \zeta_0^{2-2v}) + A_{\lambda\zeta} \right); \quad (8)$$

$$u(\zeta) = u_0 C_{\lambda\zeta} + \frac{M_0 l}{EJ_2} \frac{2(1-v)}{\lambda(1-k)} D_{\lambda\zeta} + \frac{P_0 l^2}{EJ_2} \left(\frac{2(1-v)}{\lambda(1-k)} \right)^2 (1 - C_{\lambda\zeta}); \quad (9)$$

$$M(\zeta) = \frac{u_0 EJ_2}{l} \frac{\lambda(1-k)}{2(1-v)} A_{\lambda\zeta} + M_0 B_{\lambda\zeta} - P_0 l \frac{2(1-v)}{\lambda(1-k)} A_{\lambda\zeta}; \quad (10)$$

$$Q(\zeta) = -\frac{u_0 EJ_2}{l^2} \left(\frac{\lambda(1-k)}{2(1-v)} \right)^2 C_{\lambda\zeta} - \frac{M_0}{l} \frac{\lambda(1-k)}{2(1-v)} D_{\lambda\zeta} + P_0 C_{\lambda\zeta}, \quad (11)$$

где f_0 , u_0 , M_0 , P_0 — прогиб, угол поворота, изгибающий момент и поперечная нагрузка в начале координат;

Q — поперечная сила.

При наличии распределенной нагрузки частное решение уравнения (5) находим методом вариации постоянных. Будем искать решение в виде

$$\tilde{u}(\zeta) = \zeta^v J_v(\lambda\zeta) \varphi_1(\zeta) + \zeta^v Y_v(\lambda\zeta) \varphi_2(\zeta), \quad (12)$$

где $\varphi_1(\zeta)$, $\varphi_2(\zeta)$ определяются из уравнений

$$\begin{aligned} \zeta^v J_v(\lambda\zeta) \varphi'_1(\zeta) + \zeta^v Y_v(\lambda\zeta) \varphi'_2(\zeta) &= 0; \\ \lambda \zeta^v J_{v-1}(\lambda\zeta) \varphi'_1(\zeta) + \lambda \zeta^v Y_{v-1}(\lambda\zeta) \varphi'_2(\zeta) &= \frac{l^3}{EJ_2} \left(\frac{2(1-v)}{1-k} \right)^3 \int \zeta^{1-2v} p(\zeta) d\zeta. \end{aligned} \quad (13)$$

Если $p(\zeta)$ является степенной функцией, то зависимость (12) выражается в функциях Ломмеля [13].

Рассмотрим случай $p(\zeta) = p = \text{const}$ — наиболее распространенный в инженерной практике. Тогда решение (12) получим в виде

$$\tilde{u}(\zeta) = \frac{pl^3}{EJ_2} \left(\frac{2(1-v)}{\lambda(1-k)} \right)^3 \frac{\lambda^{3v-1}}{2(1-v)} \zeta^v s_{3-3v,v}(\lambda\zeta), \quad (14)$$

$$\text{где } s_{\mu,v}(z) = z^{\mu-1} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m z^{2m+2} \Gamma\left(\frac{1}{2}\mu - \frac{1}{2}v + \frac{1}{2}\right) \Gamma\left(\frac{1}{2}\mu + \frac{1}{2}v + \frac{1}{2}\right)}{2^{2m+2} \Gamma\left(\frac{1}{2}\mu - \frac{1}{2}v + m + \frac{3}{2}\right) \Gamma\left(\frac{1}{2}\mu + \frac{1}{2}v + m + \frac{3}{2}\right)} - \text{функция}$$

Ломмеля [13], а $\Gamma(z)$ — гамма-функция.

Следует отметить, что функция Ломмеля не определяется при $\mu + v$, $\mu - v$ — отрицательных нечетных значениях [12], т.е. в нашей задаче при отрицательном нечетном значении $3-2v$ или $3-4v$. Если рассматривать класс конструкций, для которых m принимает целые значения (за исключением $3-2v$ и $3-4v$), то функция Ломмеля определена для всех целых значений m .

чением $m = 2$), т.е. $v = 0, 2, \frac{3}{2}, \frac{4}{3}, \dots$, то отдельно следует рассмотреть всего

два случая $m = 3$ и $m = 4$ ($v = 2$ и $v = 3/2$ соответственно). Возвращаясь к методу вариации постоянных, функцию (12) с учетом системы уравнений (13) получим в виде

$$\tilde{u}(\zeta) = \frac{pl^3}{EJ_2} \left(\frac{2(1-v)}{1-k} \right)^3 \frac{\pi \zeta^v}{4(1-v)} \left(Y_v(\lambda\zeta) \int \zeta^{3-3v} J_v(\lambda\zeta) d\zeta - J_v(\lambda\zeta) \int \zeta^{3-3v} Y_v(\lambda\zeta) d\zeta \right).$$

Интегрируя по частям, находим

$$\tilde{u}(\zeta) = \frac{pl^3}{EJ_2} \left(\frac{2(1-v)}{\lambda(1-k)} \right)^3 \frac{\lambda^{3v-1}}{2(1-v)} \zeta^v \bar{s}_{3-3v,v}(\lambda\zeta), \quad (15)$$

где $\bar{s}_{-3/2,3/2}(z) = -\frac{1}{2}z^{-1/2} + \frac{1}{4}z^{-1/2}\sqrt{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m z^{2m+2}}{2^{2m+2} \Gamma(m+\frac{5}{2}) \Gamma(m+1)} \times$

$$\times \left(2 \ln z - \psi\left(m+\frac{5}{2}\right) - \psi(m+1) + \psi\left(\frac{3}{2}\right) + \psi(1) \right);$$

$$\bar{s}_{-3,2}(z) = -\frac{1}{4}z^{-2} \ln z - \frac{1}{16} \ln z + \frac{1}{128} z^2 \left(\ln^2 z - \frac{1}{2} \ln z + \frac{1}{8} \right) +$$

$$+ \frac{1}{128} z^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m z^{2m+2}}{2^{2m+2} \Gamma(m+4) \Gamma(m+2)} \times$$

$$\times (2 \ln^2 z - 2(\psi(m+4) + \psi(m+2) - 2\psi(1) - 1) \ln z + \frac{1}{4} +$$

$$+ \sum_{j=0}^m \left(\frac{\Gamma(j+3)}{\Gamma(j+4)} (\psi(j+4) + \psi(j+2) - 2\psi(1) - 1) + \right.$$

$$\left. + \frac{\Gamma(j+1)}{\Gamma(j+2)} (\psi(j+3) + \psi(j+2) - 2\psi(1) - 1) \right),$$

здесь $\psi(z) = \frac{d}{dz} \ln \Gamma(z)$ – логарифмическая производная от гамма-функции [14].

Оценим влияние продольной силы на величину максимального прогиба и изгибающего момента в основании конструкций консольного типа от действия распределенной поперечной нагрузки постоянной интенсивности ($p = \text{const}$) (см. рис. 1). Для этого рассмотрим две модели стержня в состоянии продольно-поперечного и поперечного изгиба. Введем следующие безразмерные величины:

$$\tilde{M}_{\max} = \frac{M_{\max}}{pl^2} \text{ – безразмерный момент;}$$

$$\tilde{f}_{\max} = \frac{EJ_2}{pl^4} f_{\max} \text{ – безразмерный прогиб вершины стержня;}$$

$$\tilde{\lambda} = \sqrt{\frac{N_0 l^2}{EJ_2}} \text{ – безразмерная продольная сила.}$$

С учетом граничных условий закрепления консольного стержня и принятых ранее обозначений, максимальные величины прогибов и моментов для случая продольно-поперечного изгиба определяются зависимостями

$$\begin{aligned}\tilde{f}_{1,\max} &= \frac{\lambda^{3v-1}}{\tilde{\lambda}^4} \left(\frac{\zeta_0^{1-v} s_{4-3v,v-1}(\lambda\zeta_0) - s_{4-3v,v-1}(\lambda)}{8(1-v)^2} + \right. \\ &\quad + \zeta_0^{1-v} s_{2-3v,v-1}(\lambda\zeta_0) \left(\frac{D_\lambda}{C_\lambda} A_\lambda - B_\lambda + 1 \right) + \frac{\lambda^{2-3v} \zeta_0^{2(1-v)}}{2(1-v)} \left(\frac{A_\lambda}{C_\lambda} + \frac{\lambda(1-\zeta_0^{2(1-v)})}{2(1-v)} \right) - \\ &\quad \left. - \frac{s_{3-3v,v}(\lambda\zeta_0)}{2(1-v)} \frac{A_\lambda}{C_\lambda} \right); \\ \tilde{M}_{1,\max} &= \frac{\lambda^{3v-1}}{\tilde{\lambda}^2} \left(s_{2-3v,v-1}(\lambda) + \zeta_0^{1-v} s_{2-3v,v-1}(\lambda\zeta_0) \left(\frac{D_\lambda}{C_\lambda} A_\lambda - B_\lambda \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\lambda^{2-3v} \zeta_0^{2(1-v)}}{2(1-v)} \frac{A_\lambda}{C_\lambda} - \frac{s_{3-3v,v}(\lambda\zeta_0)}{2(1-v)} \frac{A_\lambda}{C_\lambda} \right).\end{aligned}$$

Из системы уравнений (2) при $N_x = 0$ для поперечного изгиба получаем выражения прогибов и моментов:

$$\begin{aligned}\tilde{f}_{2,\max} &= \frac{1-v}{2(1-k)^4 v(2-v)(3-2v)} (v(2-v) - 3v(3-2v)\zeta_0^{2(1-v)} + \\ &\quad + 3v(2-v)(3-2v)\zeta_0^{4(1-v)} - (2-v)(3-2v)\zeta_0^{6(1-v)} + 6(1-v)^3 \zeta_0^{6-4v}); \\ \tilde{M}_{2,\max} &= 1/2.\end{aligned}$$

Для случаев $m = 1; 3; 4$ (соответственно $v = 0; 2; 3/2$) выражения для прогибов будут отличаться от представленной зависимости. Общий случай к ним не применим, поэтому определяются они отдельно из решения системы уравнений (2) для соответствующих граничных условий и в тексте статьи не приводятся.

В качестве примера рассмотрим влияние продольной нагрузки на значение прогибов и изгибающих моментов для некоторых параметров конструкций. Вначале определим величину критической силы, которая в соответствии с выражением (9) для консольных конструкций находится из уравнения

$$C_\lambda = 0.$$

Численно решая уравнение, находим значение первого корня для стержней с относительным поперечным размером $k = 0,5$ и параметрами:

$$m = 1 - \tilde{\lambda}_{kp} = 1,436; \quad m = 3 - \tilde{\lambda}_{kp} = 1,156; \quad m = 4 - \tilde{\lambda}_{kp} = 1,014.$$

На графиках (рис. 2) показана зависимость относительных величин прогибов $K_f = \tilde{f}_{1,\max} / \tilde{f}_{2,\max}$ и изгибающих моментов $K_M = \tilde{M}_{1,\max} / \tilde{M}_{2,\max}$ от величины безразмерной продольной силы $\tilde{\lambda}$. Из графиков следует,

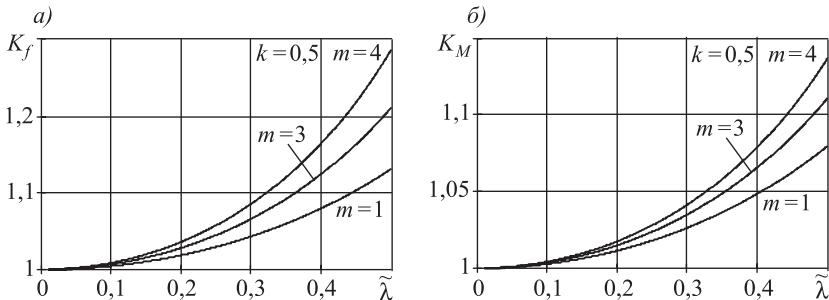


Рис. 2. Зависимость прогибов и изгибающих моментов от величины продольной силы

a – график зависимостей относительного максимального прогиба от величины безразмерной продольной силы; *б* – график зависимостей относительного изгибающего момента в основании конструкции от величины безразмерной продольной силы

что продольная нагрузка оказывает существенное влияние на величину прогибов и моментов даже при величине силы значительно меньше критической. На графиках (рис. 3) показано влияние относительного поперечного размера k на величины K_f и K_M . Из чего следует, что для стержней с большим соотношением размеров торцов влияние продольной нагрузки на величину прогибов сохраняется значительным, но при этом изменение величины изгибающего момента в основании стержня от действия продольной силы становится несущественным.

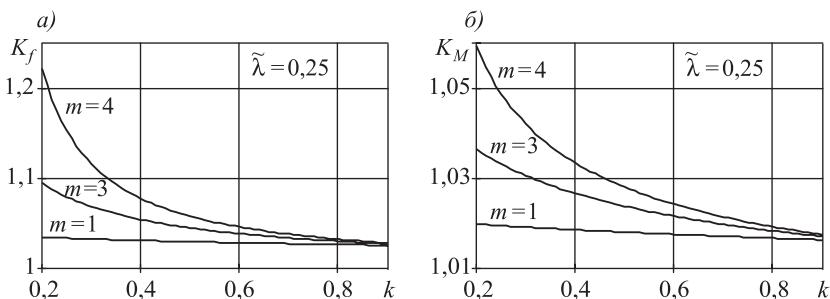


Рис. 3. Зависимость прогибов и изгибающих моментов от параметра поперечного размера

a – график зависимостей относительного максимального прогиба от параметра поперечного размера; *б* – график зависимостей относительного изгибающего момента в основании конструкции от параметра поперечного размера

Полученное решение уравнения продольно-поперечного изгиба стержней с непрерывно изменяющейся изгибной жесткостью по степенному закону в виде аналитических функций позволяет решать задачу устойчивости для произвольных условий закрепления стержней, в том числе и при наличии упругих связей. Применение метода начальных параметров упрощает процесс составления расчетных зависимостей для сложных схем. Рассмотренную математическую модель можно непосредственно использовать при исследовании напряженно-деформированного состояния конструкций или как описание элемента конструкции в программных комплексах объектного и имитационного моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Улитин Г.М. Устойчивость буровой установки роторного типа // Проблемы прочности. 2002. Т. 34. № 1. С. 130–135.
2. Царенко С.Н. Устойчивость стальной крепи при спуске на плаву // Изв. вузов. Горн. журн. 2014. № 7. С. 48–55.
3. Мищенко А.В., Немировский Ю.В. Динамический расчет сооружений башенного типа на ветровую нагрузку // Изв. вузов. Строительство. 2009. № 8. С. 3–10.
4. Улитин Г.М., Царенко С.Н. Изгибные колебания стержня с переменной жесткостью и распределенной массой // Прикладная математика и механика. 2015. Т. 79. № 6. С. 817–823.
5. Тимошенко С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. М.: Наука, 1971. 807 с.
6. Динник А.Н. Продольный изгиб, кручение. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 392 с.
7. Yang B. Stress, Strain, and Structural Dynamics: An Interactive Handbook of Formulas, Solutions, and MATLAB Toolboxes. Academic Press, 2005. 960 р.
8. Кользев А.А. Сравнительная оценка коэффициентов продольного изгиба сжатых стальных стержней из труб // Изв. вузов. Строительство. 2011. № 3. С. 105–110.
9. Крутый Ю.С. Задача Эйлера в случае непрерывной поперечной жесткости // Строительная механика и расчет сооружений. 2010. № 6. С. 22–29.
10. Крутый Ю.С. Задача Эйлера в случае непрерывной поперечной жесткости (Продолжение) // Строительная механика и расчет сооружений. 2011. № 2. С. 27–33.
11. Tsarenko S.N., Ulitin G.M. Investigation of strained deformed state of variable stiffness rod // SpringerPlus. 2014. Vol. 3. P. 367.
12. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1976. 576 с.
13. Ватсон Г.Н. Теория бесселевых функций. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1949. 798 с.
14. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. М.: Наука, 1977. 342 с.

Царенко Сергей Николаевич, канд. техн. наук, доц.

Донецкий национальный технический университет

Получено после доработки 19.12.15

Tsarenko Sergey Nikolaevich, PhD, Ass. Professor

Donetsk National Technical University

LONGITUDINAL-TRANSVERSE BENDING OF VARIABLE STIFFNESS RODS

The stress-strain state rods with continuously varying bending stiffness of according to the degree were investigated. The differential equation of the longitudinal-transverse bending rod as a mathematical model is considered. The solution of the equation in an analytical form with Bessel and Lommel functions was found. Method of initial parameters was used to find the arbitrary constants. For example, longitudinal-transverse bending arm structures with different geometrical parameters of a distributed load of constant intensity were considered. The effect of a longitudinal force on the values of the maximum displacement and bending moment in non-dimension variables has been investigated.

К e y w o r d s: rod of variable stiffness, longitudinal-transverse bending, transverse displacement, stability, Bessel functions, Lommel function.

REFERENCES

1. Ulitin G.M. Ustoychivost' burovoy ustanovki rotornogo tipa [Stability of the Column of a Rotor-Type Drilling Rig]. Problemy prochnosti [Strength Mater]. 2002. Vol. 34. No. 1. Pp. 130–135. (in Russia)
2. Tsarenko S.N. Ustoychivost' stal'noy krepi pri spuske na plavu [Stability of steel lining at afloat descent]. Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal [News of Higher Institutions. Mining Journal]. 2014. No. 7. Pp. 48–55. (in Russia)
3. Mishchenko A.V., Nemirovskiy Yu.V. Dinamicheskiy raschet sooruzheniy bashennogo tipa na vetrovuyu nagruzku [Dynamic analysis of tower type structure on wind force]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2009. No. 8. Pp. 3–10. (in Russia)
4. Ulitin G.M., Tsarenko S.N. Izgibnye kolebaniya sterzhnya s peremennoy zhestkost'yu i raspredelennoy massoy [Bending vibrations of a rod with variable stiffness and distributed mass]. Prikladnaya matematika i mehanika [Applied Mathematics and Mechanics]. 2015. Vol. 79. No. 6. Pp. 817–823. (in Russia)
5. Timoshenko S.P. Ustoychivost' sterzhney, plastin i obolochek [Stability of rods, plates and shells]. Moscow, Nauka, 1971. 807 p. (in Russia)
6. Dinnik A.N. Prodol'nyy izgib, kruchenie [The longitudinal bending, torsion]. Moscow, Publishing House of the USSR Academy of Sciences. 1955. 392 p. (in Russia)
7. Yang B. Stress, Strain, and Structural Dynamics: An Interactive Handbook of Formulas, Solutions, and MATLAB Toolboxes. Academic Press, 2005. 960 p.
8. Kol'zeev A.A. Sravnitel'naya otsenka koefitsientov prodol'nogo izgiba szhatykh stal'nykh sterzhney iz trub [Comparative estimation of stress reduction coefficients of compressed steel rods of tubes]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2011. No. 3. Pp. 105–110. (in Russia)
9. Krutiy Yu.S. Zadacha Eylera v sluchaye nepreryvnoy poperechnoy zhestkosti [Euler's problem in case of continuous transversal rigidity]. Stroitel'naya mehanika i raschet sooruzheniy [Structural Mechanics and Analysis of Constructions]. 2010. No. 6. Pp. 22–29. (in Russia)
10. Krutiy Yu.S. Zadacha Eylera v sluchaye nepreryvnoy poperechnoy zhestkosti (Prodolzhenie) [Euler's problem in case of continuous transversal rigidity (continuation)]. Stroitel'naya mehanika i raschet sooruzheniy [Structural Mechanics and Analysis of Constructions]. 2011. No. 2. Pp. 27–33. (in Russia)
11. Tsarenko S.N., Ulitin G.M. Investigation of strained deformed state of variable stiffness rod. SpringerPlus. 2014. Vol. 3. P. 367.
12. Kamke E. Differentialgleichungen: Lösungsmethoden und Lösungen. Leipzig, Teubner, 1977. 576 p.
13. Watson G.N. A Treatise on the Theory of Bessel Functions. Cambridge University, Cambridge, 1922. 812 p.
14. Jank E., Emde F., Lösch F. Tables of Higher Functions. Stuttgart, Teubner, 1960. 344 p.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.51/.55 : 539.4

Н.Р. РАХИМОВА, Р.З. РАХИМОВ

ВЛИЯНИЕ ХИМИКО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА ДОБАВОК ИЗВЕСТНЯКА НА СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО ШЛАКОЩЕЛОЧНОГО ВЯЖУЩЕГО

Приведены результаты исследований влияния химико-минералогического состава известняка на свойства теста и камня композиционного шлакощелочного вяжущего, активированного щелочным отходом ОАО «Нижнекамскнефтехим». Показана возможность замены шлака молотым известняком до 60 % и увеличения прочностных характеристик камня композиционного шлакощелочного вяжущего до 48,8 %. Упрочняющий эффект добавок возрастает с увеличением содержания кальцита в составе известняка. На основании результатов исследований методами рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии установлено, что известняк – эффективная «физически активная» добавка к шлакощелочным вяжущим, которая не образует соединений с вяжущими свойствами, но положительно влияет на прочность и микроструктуру камня композиционного вяжущего.

Ключевые слова: шлак, известняк, прочность, шлакощелочное вяжущее, рентгенофазовый анализ.

Введение. В поисках путей устойчивого развития цементной промышленности разрабатываются различные виды альтернативных видов вяжущих, одними из наиболее привлекательных с экологической и технической точек зрения среди которых являются активированные щелочами цементы [1–4]. В настоящее время они образуют довольно обширную группу вяжущих веществ, для получения которых определена большая сырьевая база из природного и техногенного минерального кальциевого и бескальциевого алюмосиликатного сырья. Наиболее перспективными с точки зрения производства в промышленном масштабе признаны доменный гранулированный шлак и золы. Это связано с тем, что в отличие от активированных глин бетоны на их основе обеспечивают сочетание низкой водопотребности и приемлемых реологических свойств с высокой механической прочностью. В то же время шлаки и золы требуемого качества не являются повсеместно распространенным и доступным сырьем. Поэтому одно из направлений развития активированных щелочами цементов – введение минеральных добавок с получением композиционных вяжущих [5, 6]. Другим препятствием на пути коммерциализации активированных щелочами цементов является экологический аспект получения и дороговизна щелочных компонентов активированных щелочами вяжущих – жидкого стекла, едкого натра и др. В этом отношении актуален поиск и исследова-

ние в качестве активаторов активированных щелочами цементов крупнотоннажных щелочесодержащих отходов [7].

Одной из широко применяемых добавок благодаря химико-минералогическому составу и распространенности в технологии композиционных портландцементов является молотый известняк. В Европе композиционные портландцементы с добавкой молотого известняка являются наиболее широко применяемыми видами вяжущих. Согласно EN 197-1 в цементах СЕМ II/A-L и СЕМ II/B-L содержание известняка составляет 20 и 35 % соответственно. Многочисленными исследованиями показана эффективность применения молотого известняка и в качестве добавки к активированным щелочами вяжущим [8–10], включая шлакощелочные (ШЩВ) [11–15]. Следует отметить, что свойства композиционных вяжущих определяются большим числом факторов, включающих факторы влияния матрицы, минеральных добавок и технологические факторы [16]. Важный фактор влияния минеральных добавок – их химико-минералогический состав, влияние которого на свойства композиционных шлакощелочных вяжущих (КШЩВ) с добавкой молотого известняка в упомянутых работах исследовано недостаточно полно.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния химико-минералогического состава известняка на температуру гидратации, прочность, состав продуктов твердения и микроструктуру композиционного шлакощелочного вяжущего, активированного щелочным отходом ОАО «Нижнекамскнефтехим».

Объекты и методы исследований. Для приготовления образцов использовались доменный гранулированный шлак Челябинского металлургического комбината (ЧМК) и три известняка различного химико-минералогического состава. Шлак ЧМК размалывался до удельной поверхности 300 м²/кг на лабораторной планетарной мельнице МПЛ-1, а известняк до удельной поверхности 600 м²/кг. Химический состав исходных материалов представлен в табл. 1. Минеральный состав известняков показан на рис. 1.

В качестве щелочного активатора использовался водный раствор отхода ОАО «Нижнекамскнефтехим» плотностью 1,2 г/см³, состав которого приведен в табл. 2.

Прочность при сжатии образцов определялась испытанием образцов размером 2×2×2 см в возрасте 28 сут нормально-влажностного твердения. Состав продуктов твердения образцов определялся в возрасте 28 сут методом рентгенофазового анализа (РФА), микроструктура методом сканирующей электронной микроскопии.

Таблица 1. Химический состав исходных материалов

Материал	Содержание, %												
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	CO ₂	П.п.п.
Шлак	37,49	36,22	11,58	8,61	0,50	0,16	1,80	0,64	0,95	0,01	2,00	–	–
Известняк 1	14,26	43,31	2,44	0,84	–	1,11	0,12	0,38	0,51	0,08	–	35,62	36,28
Известняк 2	1,26	39,79	0,20	12,94	–	0,08	0,01	0,08	0,07	<0,01	–	44,33	45,50
Известняк 3	0,47	55,06	0,07	0,49	–	0,05	0,01	0,03	0,01	0,02	–	43,66	43,83

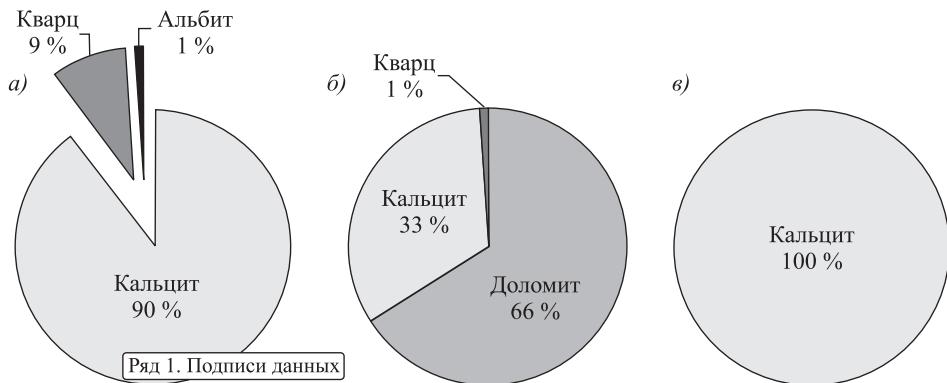


Рис. 1. Минеральный состав известняков
а – известняк 1, б – известняк 2, в – известняк 3

Таблица 2. Состав щелочного отхода ОАО «Нижнекамскнефтехим»

Содержание, %						
Na ₂ MoO ₄	Na ₂ SiO ₃	Na ₂ CrO ₄	H ₂ O	NaOH	Na ₂ CO ₃	Механические примеси
1,6	1,05	0,92	1,58	2,65	91,4	0,8

Результаты и обсуждение. Нормальная густота теста КШЩВ при введении известняка в количестве до 70 % независимо от его концентрации и вида известняка существенно не изменялась и составляла 25–26 %. Эти результаты согласуются с данными исследования влияния известняка на водопотребность теста как для вяжущих на основе портландцемента [17], так и активированных щелочами вяжущих [15].

Зависимости прочности при сжатии камня КШЩВ в возрасте 28 сут представлены на рис. 2.

Согласно приведенным данным, наибольшее влияние добавок известняка на прочность камня КШЩВ оказывает известняк 3, которое сопровождается увеличением прочности до 48,8 % при содержании добавки до 30 %. Введение 30 % добавок известняков 1 и 2 повышает прочность камня КШЩВ до 37,4 и 33,5 % соответственно.

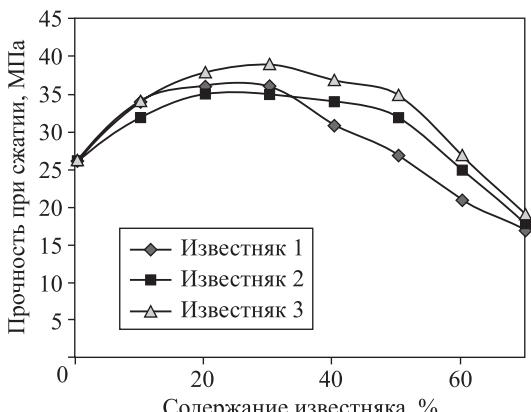


Рис. 2. Влияние вида и содержания известняка на прочность при сжатии камня КШЩВ

Необходимо отметить также, что при содержании добавок известняка 2 и 3 60%-я прочность камня КШЩВ сопоставима с прочностью контрольного состава.

Образцы камня ШЩВ и КШЩВ в 28-суточном возрасте с добавками известняков в количестве, обеспечивающем максимальный прирост прочности 30 % и максимально возможном содержании 60 %, приведенные в табл. 3,

были исследованы методами РФА и сканирующей электронной микроскопии. Результаты этих исследований приведены на рис. 3–6.

Основным продуктом твердения ШЩВ является кальциевый алюмосиликатный гидрогель C–A–S–H, отражаемый на дифрактограммах в виде рентгеноаморфной фазы [18–20]. В связи с тем, что щелочной отход состоит преимущественно из карбоната натрия, целесообразно сопоставить представленные на рис. 3, 4 с ранее опубликованными результатами исследований продуктов твердения камня, активированного содой ШЩВ. В работе С.А. Бернал и др. [21] методом РФА идентифицированы кальциево-силикатный гидрогель C–S–H, кальцит, следы галлуазита и манасеита ($Mg_6Al_2CO_3(OH)_{16} \cdot 4H_2O$ или $Mg_6Al_2(OH)_{18} \cdot 5H_2O$). М. Ковтуном и др. [22] обнаружены тоберморит $Ca_{2,25}Si_3O_{7,5}(OH)_{1,5}H_2O$, кальцит и галлуазит. Полученные нами результаты

Таблица 3. Составы ШЩВ и КШЩВ

Обозначение вяжущего	Вид известняка	Содержание известняка, %
ШЩВ	–	–
КШЩВ1	Известняк 1	30
КШЩВ2	Известняк 2	30
КШЩВ3	Известняк 3	30
КШЩВ4	Известняк 3	60

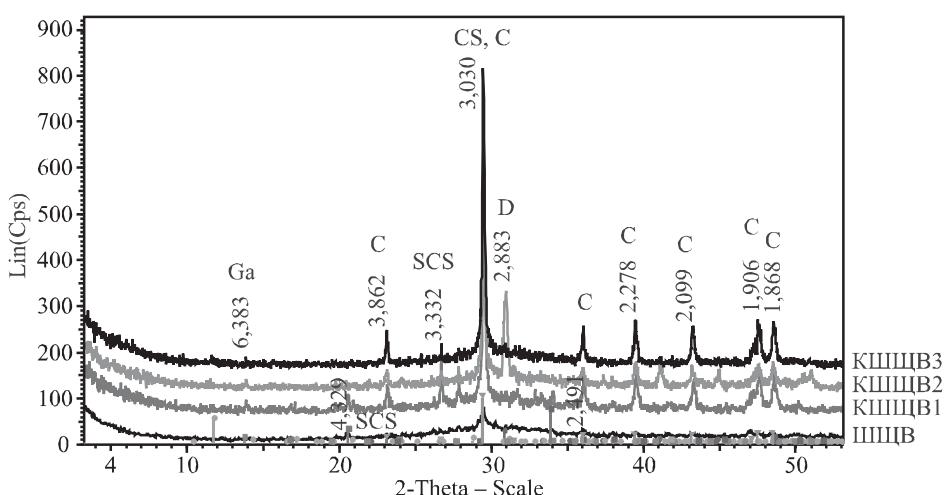


Рис. 3. Дифрактограммы образцов камня ШЩВ, КШЩВ1, КШЩВ2, КШЩВ3
C – кальцит, Ga – галлуазит, D – доломит, SCS – кальций-натриевый силикат, CS – кальциево-силикатный гидрогель

согласуются с упомянутыми работами в части идентификации C–A–S–H, C–S–H, кальцита и галлуазита. Обнаружен также натриево-кальциевый силикат Na_2CaSiO_4 , образование которого возможно ввиду присутствия в щелочном отходе Na_2SiO_3 . Что касается продуктов гидратации КШЩВ1, КШЩВ2, КШЩВ3 с добавками известняка, в их составе помимо тех, что идентифицированы в контрольном составе, обнаружены также реликтовые минералы добавок известняков – во всех составах кальцит, а в КШЩВ2 также доломит. Полученные результаты согласуются с данными Х. Гао и др. [15], показавших, что введение добавок известняка не влияет на состав новообразований камня КШЩВ. Вместе с тем результаты отдельных исследований процессов гидратации, например, портландцемента, показали,

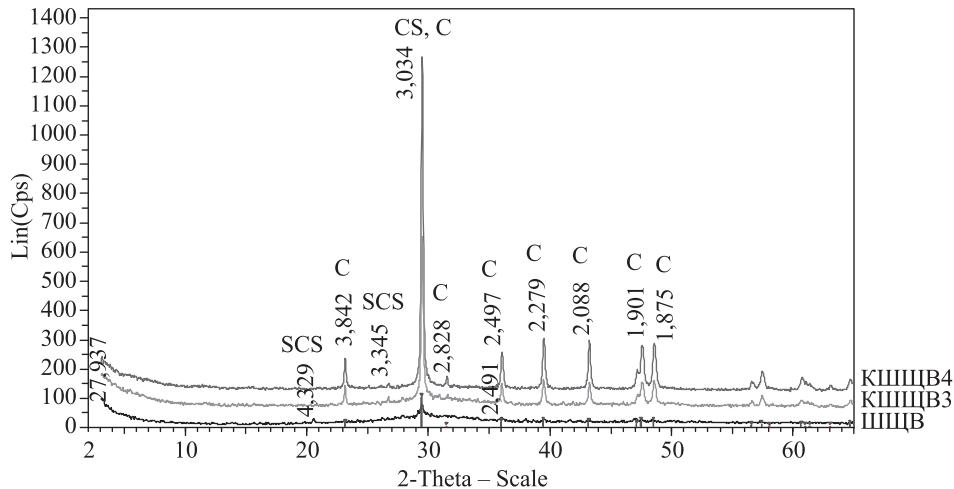


Рис. 4. Дифрактограммы образцов камня ШЩВ, КШЩВ3, КШЩВ4
С – кальцит, CS – кальциево-силикатный гидрогель, SCS – кальций-натриевый силикат

что добавки карбонатов кальция и магния повышают степень полимеризации кремнекислородных ионов и прочность гидросиликатов кальция [23]. Возможно, что они также влияют и на гидросиликаты КШЩВ.

Анализ микроструктуры образцов бездобавочного ШЩВ и КШЩВ показывает, что введение добавок известняка способствует снижению количества усадочных микротрещин. Непрореагировавшие частицы шлака

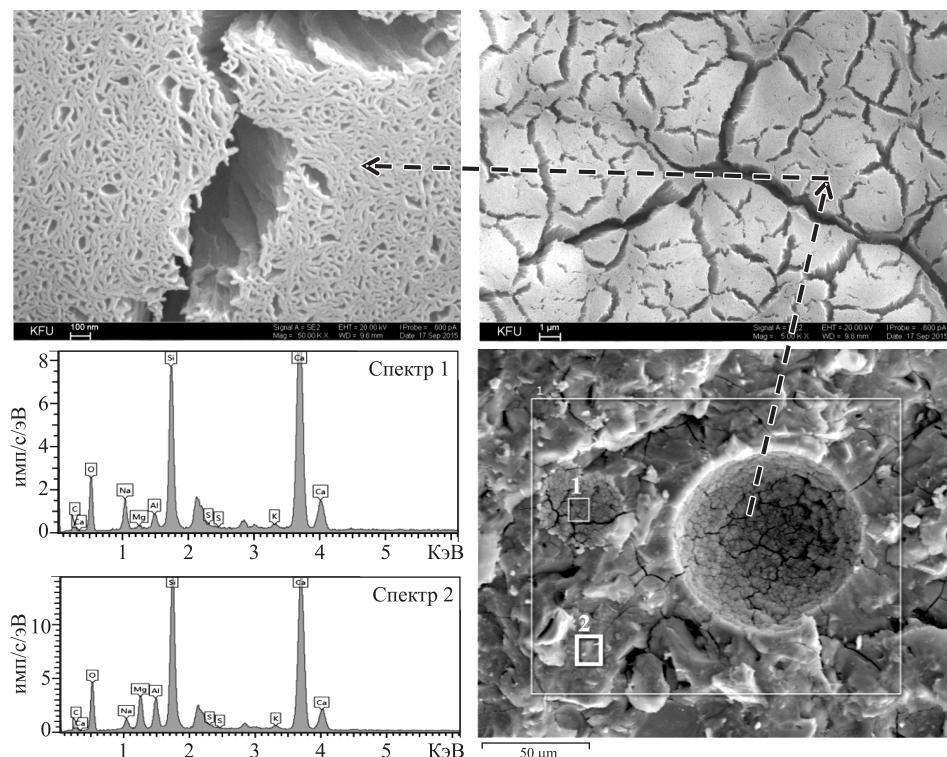


Рис. 5. Результаты исследований образцов камня на основе ШЩВ методом сканирующей электронной микроскопии

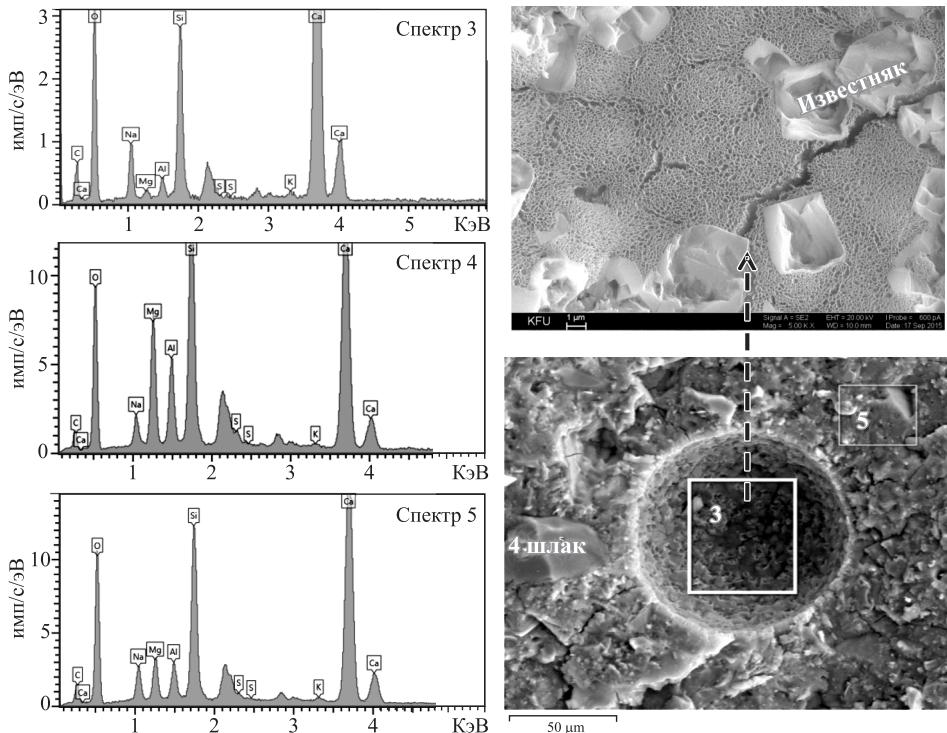


Рис. 6. Результаты исследований образцов камня на основе КШЩВЗ методом сканирующей электронной микроскопии

и частицы известняка также видны на рис. 6. Количественный анализ состава минеральной матрицы ШЩВ и КШЩВ показал, что соотношение Ca/Si для ШЩВ и КШЩВЗ составляет $1,3(\pm 0,71)$ и $1,24(\pm 1,3)$ соответственно. Эти данные превышают показатель, характерный для ШЩВ и составляющий (≈ 1) [1, 24, 25], что предположительно связано с высоким содержанием кальцита в объеме матрицы.

Таким образом, согласно приведенным данным, известняк является эффективной «физически активной» добавкой, которая не образует соединений с вяжущими свойствами, но влияет на структуру и свойства камня композиционных вяжущих [26]. Повышение же прочности обусловлено влиянием добавок известняка как тонкодисперсного наполнителя, который без увеличения водопотребности теста улучшает гранулометрический состав композиционного вяжущего, плотность упаковки частиц и, как следствие, камня. Хорошая совместимость шлака и известняка обусловлена также химико-минералогическим сродством кальцита, входящего в состав исследованных известняков, с кальцитом, являющимся одним из продуктов твердения камня КШЩВ, активированного карбонатом натрия. Это объясняет наибольший упрочняющий эффект добавки известняка 3 по сравнению с известняками 1 и 2.

Заключение. 1. Установлена возможность замены шлака молотым известняком до 60 % и увеличения прочностных характеристик камня композиционного шлакощелочного вяжущего до 48,8 %. Упрочняющий эффект добавок возрастает с увеличением содержания кальцита в составе известняка.

2. Известняк – эффективная «физически активная» добавка к шлакощелочным вяжущим, которая не образует соединений с вяжущими свойствами, но положительно влияет на прочность и микроструктуру камня композиционного вяжущего благодаря улучшению гранулометрического состава композиционного вяжущего, повышению плотности упаковки частиц и, как следствие, камня, снижению усадочных микротрещин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Provis J.L., Van Deventer J.S.J. Alkali activated materials, state-of-the-art report. RILEM, TC 224-AAM. Springer, 2014. 388 p.
2. Pacheco-Torgal F., Labrincha J.A., Leonelli C., Palomo A., Chindaprasir P. Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2014.
3. Provis J.L., Palomo A., Shi C. Advances in understanding alkali-activated materials // Cement and Concrete Research. 2015. Vol. 78. Pp. 110–125.
4. Provis J.L., Berna S.A. Geopolymers and related alkali-activated materials // Annual Review of Materials Research. 2014. Vol. 44. Pp. 299–327.
5. Rakimova N.R., Rakimov R.Z. Characterization of ground hydrated Portland cement-based mortar as an additive to alkali-activated slag cement // Cement and Concrete Composites. 2015. Vol. 57. Pp. 55–63.
6. Rakimova N.R., Rakimov R.Z. Alkali-activated cements and mortars based on blast furnace slag and red clay brick waste // Materials & Design. 2015. Vol. 85(11). Pp. 324–331.
7. Рахимова Н.Р., Рахимов Р.З., Хамитова Р.Ф. Использование отходов ОАО «Нижнекамскнефтехим» для получения активированных щелочами цементов // Экология и промышленность России. 2015. № 1. С. 34–37.
8. Yip C.K., Provis J.L., Lukey G.C., Deventer J.S.J. Carbonate mineral addition to metakaolin-based geopolymers // Cement and Concrete Composites. 2008. Vol. 30(3). Pp. 979–985.
9. Avila-López U., Almanza-Robles J.M., Escalante-García J.I. Investigation of novel waste glass and limestone binders using statistical methods // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 82. Pp. 296–303.
10. Boonjaeng S., Chindaprasirt P., Pimraksa K. Lime-calcined clay materials with alkaline activation: Phase development and reaction transition zone // Applied Clay Science. 2014. Vol. 95. Pp. 357–364.
11. Хвастунов В.Л. Экспериментально-теоретические основы получения композиционных вяжущих и строительных материалов из шлаков и высокодисперсных пород: автореф. дис. ... д-ра технических наук. Пенза, 2005. 48 с.
12. Sakulich A.R., Anderson E., Schauer C., Barsoum M.W. Mechanical and microstructural characterization of an alkali-activated slag/limestone fine aggregate concrete // Construction and Building Materials. 2009. Vol. 23. Pp. 2951–2959.
13. Bilek V. Slag alkaline concrete with mineral admixtures. Proceedings of XIII International Congress on the Chemistry of Cement. Madrid, 3-8 July 2011. P. 190.
14. Moseson A.J., Moseson D.E., Barsoum M.W. High volume limestone alkali-activated cement developed by design of experiment // Cement and Concrete Composites. 2012. Vol. 34(3). Pp. 328–336.
15. Gao X., Yu Q.L., Brouwers H.J.H. Properties of alkali activated slag-fly ash blends with limestone addition // Cement and Concrete Composites. 2015. Vol. 59. Pp. 119–128.
16. Рахимова Н.Р. Шлакощелочные вяжущие и бетоны с силикатными и алюмосиликатными минеральными добавками: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Казань, 2010. 38 с.

17. Tsivilis S., Chaniotakis E., Badogiannis E., Pahoula G., Ilias A. A study on the parameters affecting the properties of Portland limestone cements // Cement and Concrete Composites. 1999. Vol. 21. Pp. 107–116.
18. Puertas F., Palacios M., Manzano H., Dolado J.S., Rico A., Rodríguez J. A model for the C–A–S–H gel formed in alkali-activated slag cements // Journal of European Ceramic Society. 2011. Vol. 31. Pp. 2043–2056.
19. García-Lodeiro I., Palomo A., Fernández-Jiménez A., Macphree D.E. Compatibility studies between N–A–S–H and C–A–S–H gels. Study in the ternary diagram Na₂O–CaO–Al₂O₃–SiO₂–H₂O // Cement and Concrete Research. 2011. Vol. 41. Pp. 923–931.
20. Lecomte I., Henriet C., Liégeois M., Maseri F., Rulmont A., Cloots R. (Micro)-structural comparison between geopolymers, alkali-activated slag cement and Portland cement // Journal of European Ceramic Society. 2006. Vol. 26. Pp. 3789–3797.
21. Bernal S.A., Ke X., Provis J.L. Activation of slags using near-neutral salts: the importance of slag chemistry, Abstract book of the 14th International Congress on the Chemistry of Cement. Vol. II, 13–16 October 2015, Beijing, China. P. 597.
22. Kovtun M., Kearney E.P., Shekhtovtsova J. Chemical acceleration of a neutral granulated blast-furnace slag activated by sodium carbonate // Cement and Concrete Research. 2015. Vol. 72. Pp. 1–9.
23. Тимашев В.В., Кожемякин Г.В. Влияние добавок карбонатов кальция и магния на процессы гидратации портландцемента: сб. трудов МХТИ. 1981. Вып.118. С. 70–78.
24. Ben Haha M., Le Saout G., Winnefeld F., Lothenbach B. Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags // Cement and Concrete Research. 2011. Vol. 41. Pp. 301–310.
25. Bernal S.A., San Nicolas R., Myers R.J., Mejía de Gutiérrez R., Puertas F., van Deventer J.S.J., Provis J.L. MgO content of slag controls phase evolution and structural changes induced by accelerated carbonation in alkali-activated binders // Cement and Concrete Research. 2014. Vol. 57. Pp. 33–43.
26. Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р. Научные, экспериментальные, технико-экономические и технологические предпосылки управления структурой и свойствами наполненных искусственных строительных композиционных материалов // Градостроительство. 2011. № 4(14). С. 73–79.

Рахимова Наиля Равилевна, д-р техн. наук, проф.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Рахимов Равиль Зуфарович, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РААСН

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 17.12.15

Rakhimova Nailya Ravilevna, DSc, Professor

Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

Rakhimov Ravil' Zufarovich, DSc, Professor, Cor. Member of RAASN

Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

INFLUENCE OF CHEMICAL-MINERALOGICAL COMPOSITION OF LIMESTONE ADDITION ON THE PROPERTIES OF THE BLENDED ALKALI-ACTIVATED SLAG CEMENTS

The results of studies of the influence of chemical-mineralogical composition of the limestone on the properties of the fresh and hardened pastes of the blended alkali-activated

slag cements activated by alkaline waste OAO «Nizhnekamskneftekhim» are presented. The possibility of the blast furnace slag replacement by limestone up to 60 % and improvement of the compressive strength up to 48,8 %. The reinforcing effect increases with the content of calcite in the composition of limestone. Based on the results of studies by X-ray diffraction, scanning electron microscopy it is stated that limestone is effective «physically active» for alkali-activated slag cements, which does not form hydration products with binding properties, but positively effects on the microstructure and strength of the blended cement.

Ke y w o r d s: slag, limestone, strength, alkali-activated slag cement, X-ray analysis.

REFERENCES

1. Provis J.L., Van Deventer J.S.J. Alkali activated materials, state-of-the-art report. RILEM, TC 224-AAM. Springer, 2014. 388 p.
2. Pacheco-Torgal F., Labrinchá J.A., Leonelli C., Palomo A., Chindaprasir P. Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes. Cambridge, Woodhead Publishing Limited, 2014.
3. Provis J.L., Palomo A., Shi C. Advances in understanding alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*. 2015. Vol. 78. Pp. 110–125.
4. Provis J.L., Bernal S.A. Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*. 2014. Vol. 44. Pp. 299–327.
5. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. Characterization of ground hydrated Portland cement-based mortar as an additive to alkali-activated slag cement. *Cement and Concrete Composites*. 2015. Vol. 57. Pp. 55–63.
6. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. Alkali-activated cements and mortars based on blast furnace slag and red clay brick waste. *Materials & Design*. 2015. Vol. 85(11). Pp. 324–331.
7. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z., Hamitova R.F. Ispol'zovanie othodov OAO «Nizhnekamskneftekhim» dlya polucheniya aktivirovannykh shchelochami tsementov [Use of waste of JSC «Nizhnekamskneftekhim» for receiving the cements activated by alkalis]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and the industry of Russia]. 2015. No.1. Pp. 34–37. (in Russia)
8. Yip C.K., Provis J.L., Luke G.C., Deventer J.S.J. Carbonate mineral addition to metakaolin-based geopolymers. *Cement and Concrete Composites*. 2008. Vol. 30(3). Pp. 979–985.
9. Avila-López U., Almanza-Robles J.M., Escalante-García J.I. Investigation of novel waste glass and limestone binders using statistical methods. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 82. Pp. 296–303.
10. Boonjaeng S., Chindaprasirt P., Pimraksa K. Lime-calcined clay materials with alkaline activation: Phase development and reaction transition zone. *Applied Clay Science*. 2014. Vol. 95. Pp. 357–364.
11. Hvatstunov V.L. Eksperimental'no-teoreticheskie osnovy polucheniya kompozitsionnykh vyazhushchikh i stroitel'nykh materialov iz shlakov i vysokodispersnykh porod: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk [Experimental and theoretical bases of receiving the blended cement construction materials from slags and high-disperse breeds: abstract of the thesis of DSc]. Penza, 2005. 48 p. (in Russia)
12. Sakulich A.R., Anderson E., Schauer C., Barsoum M.W. Mechanical and microstructural characterization of an alkali-activated slag/limestone fine aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2009. Vol. 23. Pp. 2951–2959.
13. Bilek V. Slag alkaline concrete with mineral admixtures. Proceedings of XIII International Congress on the Chemistry of Cement. Madrid, 3-8 july 2011. P. 190.

14. Moseson A.J., Moseson D.E., Barsoum M.W. High volume limestone alkali-activated cement developed by design of experiment. *Cement and Concrete Composites*. 2012. Vol. 34(3). Pp. 328–336.
15. Gao X., Yu Q.L., Brouwers H.J.H. Properties of alkali activated slag-fly ash blends with limestone addition. *Cement and Concrete Composites*. 2015. Vol. 59. Pp. 119–128.
16. Rakhimova N.R. Shlakoshchelochnye vyazhushchie i betony s silikatnymi i alyumosilikatnymi mineral'nyimi dobavkami: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk. [Slag-alkaline knitting and concrete with silicate and alyumosilicate mineral additives: abstract of the thesis of the Doctor of Engineering]. Kazan, 2010. 38 p. (in Russia)
17. Tsivilis S., Chaniotakis E., Badogiannis E., Pahoulasa G., Ilias A. A study on the parameters affecting the properties of Portland limestone cements. *Cement and Concrete Composites*. 1999. Vol. 21. Pp. 107–116.
18. Puertas F., Palacios M., Manzano H., Dolado J.S., Rico A., Rodríguez J. A model for the C–A–S–H gel formed in alkali-activated slag cements. *Journal of European Ceramic Society*. 2011. Vol. 31. Pp. 2043–2056.
19. García-Lodeiro I., Palomo A., Fernández-Jiménez A., Macpherson D.E. Compatibility studies between N–A–S–H and C–A–S–H gels. Study in the ternary diagram Na₂O–CaO–Al₂O₃–SiO₂–H₂O. *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41. Pp. 923–931.
20. Lecomte I., Henrist C., Liégeois M., Maseri F., Rulmont A., Cloots R. (Micro)-structural comparison between geopolymers, alkali-activated slag cement and Portland cement. *Journal of European Ceramic Society*. 2006. Vol. 26. Pp. 3789–3797.
21. Bernal S.A., Ke X., Provis J.L. Activation of slags using near-neutral salts: the importance of slag chemistry, Abstract book of the 14th International Congress on the Chemistry of Cement. Vol. II, 13–16 October 2015, Beijing, China. P. 597.
22. Kovtun M., Kearsley E.P., Shekhovtsova J. Chemical acceleration of a neutral granulated blast-furnace slag activated by sodium carbonate. *Cement and Concrete Research*. 2015. Vol. 72. Pp. 1–9.
23. Timashov V.V., Kozhemyakin G.V. Vliyanie dobavok karbonatov kal'tsiya i magniya na processy hidratisatsii portlandsementa: sb. trudov MHTI. [Influence of additives of carbonates of calcium and magnesium on processes of hydration of a portlandsement: collection of works MCTI]. 1981. Fasc. 118. Pp. 70–78. (in Russia)
24. Ben Haha M., Le Saout G., Winnefeld F., Lothenbach B. Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags. *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41. Pp. 301–310.
25. Bernal S.A., San Nicolas R., Myers R.J., Mejía de Gutiérrez R., Puertas F., van Deventer J.S.J., Provis J.L. MgO content of slag controls phase evolution and structural changes induced by accelerated carbonation in alkali-activated binders. *Cement and Concrete Research*. 2014. Vol. 57. Pp. 33–43.
26. Rakimov R.Z., Rakimova N.R. Nauchnye, eksperimental'nye, tekhniko-ekonomicheskie i tekhnologicheskie predposylki upravleniya strukturoy i svoystvami napolnennykh iskusstvennykh stroitel'nykh kompozitsionnykh materialov [Scientific, experimental, technical and economic and technological prerequisites of management of structure and properties of the filled artificial construction composite materials]. [Gradostroitel'stvo]. 2011. No. 4(14). Pp. 73–79. (in Russia)

УДК 691:699.86:536.21

Т.А. НИЗИНА, А.Е. ИНИН, В.А. НЕВЕРОВ

ВЛИЯНИЕ ОБЖИГА ДИАТОМИТА НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКИХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Приведены результаты экспериментальных исследований теплопроводности жидких теплоизоляционных покрытий, полученных на основе тонкодисперсных минеральных наполнителей (диатомит обожженный и необожженный, белая сажа) и стеклянных микросфер. В качестве базовых связующих использовались акриловые дисперсии Акрэмос-101 и Эколат-2014. По результатам проведенных исследований выявлено влияние предварительной термической обработки диатомита при температуре 550 °C в течение 5 ч на теплофизические характеристики жидких теплоизоляционных покрытий. Проведена оптимизация составов по содержанию тонкодисперсных минеральных наполнителей, полых стеклосфер и виду акриловой дисперсии с учетом получения покрытий с наименьшими коэффициентами теплопроводности.

Ключевые слова: энергосбережение, теплоизоляция, минеральные порошки, диатомит, стеклосфера, белая сажа, теплопроводность.

На сегодняшний день одним из наиболее перспективных теплоизоляционных материалов являются жидкие теплоизоляционные покрытия (ЖТП) на основе полимерного связующего и полых микросфер. На основе ранее проведенных исследований [1–3] экспериментально подтверждено, что для снижения себестоимости разрабатываемых покрытий целесообразно использовать тонкодисперсные минеральные порошки, позволяющие существенно снижать расход дорогих микросфер без потери эксплуатационных характеристик покрытий.

Строительная и теплоизоляционная промышленность – один из основных потребителей тонкодисперсных минеральных порошков, в состав которых входят частицы нанометрового размера с развитой поровой структурой. Благодаря их уникальной пористости на их основе можно создавать эффективные теплоизоляционные материалы с высокими теплоизоляционными свойствами. Теплоизоляционные материалы на основе минеральных порошков отличаются экологичностью, огнестойкостью и биостойкостью. Известно, что чем меньше размер пор или пустот материала, тем меньше теплопроводность всей зернистой системы. Поэтому одними из перспективных минеральных порошков являются порошки на основе диатомитов, обладающие наноструктурированным поровым пространством [4, 5].

Природные диатомиты представляют собой легкие пористые осадочные породы, образованные в основном окаменелыми остатками диатомовых водорослей, состоящих в основном из аморфного опалового кремнезема. Размер створок диатомей находится в пределах от 0,03 до 0,15 мм. Содержание SiO_2 в диатомитах может изменяться от 62 до 97 %. В качестве постоянной примеси присутствуют глинистые минералы (5–10 %), кото-

рые характеризуются высокой дисперсностью с размером частиц, как правило, меньшим 0,01 мм.

В природном состоянии диатомит содержит до 45 % свободной влаги, а его водопоглощение доходит до 140 %. Наличие влаги в порах диатомита приводит к ухудшению его теплоизоляционных свойств. С целью снижения коэффициента теплопроводности ЖТП было предложено использовать при его производстве обожженный диатомит, получаемый после температурного воздействия на материал при 550 °C в течение 5 ч. Предварительный обжиг диатомита при температурах (500÷700 °C) освобождает адсорбционное пространство от воды, а также позволяет удалить структурную воду. Также при обжиге диатомита снижаются его адсорбционные свойства в связи со снижением степени гидратации его поверхности [6].

В предыдущих экспериментальных исследованиях, результаты которых изложены в работах [3–5], в качестве одного из наполнителей с низкой теплопроводностью (0,051 Вт/(м×К)) были использованы микросфера марки K15 производства компании 3M Glass Bubbles. Однако учитывая, что микросферы данной марки обладают относительно небольшой устойчивостью к раздавливанию (21 бар), что может привести в случае даже небольшого отклонения от технологических режимов перемешивания к их разрушению и, как следствие, снижению теплоизоляционных характеристик покрытий, было решено заменить их на микросферы K20 той же компании. Стеклянные микросфера марки K20 обладают более высокой устойчивостью к раздавливанию – 34 бар и коэффициентом теплопроводности – 0,065 Вт/(м×К). Основные характеристики стеклянных микросфер марок K15 и K20, изготовленных на основе боросиликатного стекла, приведены в табл. 1.

При проведении экспериментальных исследований по разработке эффективных составов ЖТП использовались методы математического планирования. В качестве варьируемых факторов были выбраны: диатомиты необожженный (X_1) и обожженный (X_2); белая сажа (X_3), вид (марка) акриловой дисперсии (X_4) и доля микросфер (X_5). Содержание специализированных видов добавок (для всех исследуемых составов) и загустителя Акрэмос-401 (для составов с акриловой дисперсией Акрэмос-101) принималось постоянным по отношению к массе связующего. Уровни варьирования переменных факторов приведены в табл. 2.

Таблица 1. Основные характеристики стеклянных микросфер марок K15 и K20 производства 3MTM Glass Bubbles

Характеристики	Марка микросфер							
	K15				K20			
Истинная плотность, г/см ³	0,15				0,20			
Средний диаметр, мкм	60				65			
Толщина стенки, мкм	0,60				0,88			
Отношение $V_{\text{внутр}}/V_{\text{общ}}$	0,94				0,92			
Устойчивость к раздавливанию (90 % неповрежденных), бар	21				34			
Распределение частиц по объему, мкм	10 %	50 %	90 %	95 %	10 %	50 %	90 %	95 %
	30	60	105	115	30	65	110	120

Таблица 2. Уровни варьирования переменных факторов

Исследуемые факторы			Уровни варьирования		
обозначение	наименование	единицы измерения	-1	0	+1
X_1	Диатомит необожженный	% от массы ЖТП	0	5	10
X_2	Диатомит обожженный	% от массы ЖТП	0	5	10
X_3	Белая сажа	% от массы ЖТП	0	2,5	5
X_4	Вид акриловой дисперсии	—	Акрэмос-101	—	Эколат-2014
X_5	Стеклосфера K20	% от массы ЖТП	12,5	15	17,5

Коэффициент теплопроводности разработанных составов определяли с помощью прибора ИТС-1 в соответствии с ГОСТ 7076–99 «Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме». Графические зависимости, показывающие изменение теплопроводности ЖТП, обусловленное содержанием диатомита (a – необожженного; b – обожженного) и белой сажи при фиксированном уровне акриловой дисперсии Акрэмос-101 и содержании стеклосфер 12,5 и 17,5 % от массы ЖТП, приведены соответственно на рис. 1 и 2. Установлено, что при использовании в составах теплоизоляционных покрытий обожженного диатомита наилучшими теплопроводностными характеристиками обладают композиты с содержанием: 5 % белой сажи и 4,5÷6,5 % диатомита (см. рис. 1, 2, b). В случае использования необожженного диатомита наибольшие оптимальные значения по теплопроводности (ниже 0,07 Вт/(м×К)) зафиксированы для составов, содержащих 7÷10 % диатомита и 3÷5 % белой сажи (см. рис. 1, a). Со снижением в составе ЖТП минеральных добавок наблюдается повышение коэффициента теплопроводности; в случае отсутствия в составе теплоизоляционных покрытий диатомита и белой сажи (см. рис. 1, 2) значения достигают 0,1 Вт/(м×К).

Увеличение доли стеклосфер с 12,5 до 17,5 % не приводит к изменению вида трехмерных поверхностей, однако по абсолютным значениям теплопроводности наблюдается значительное снижение данного показателя (см. рис. 1, 2). Наименьшие значения теплопроводности для составов с

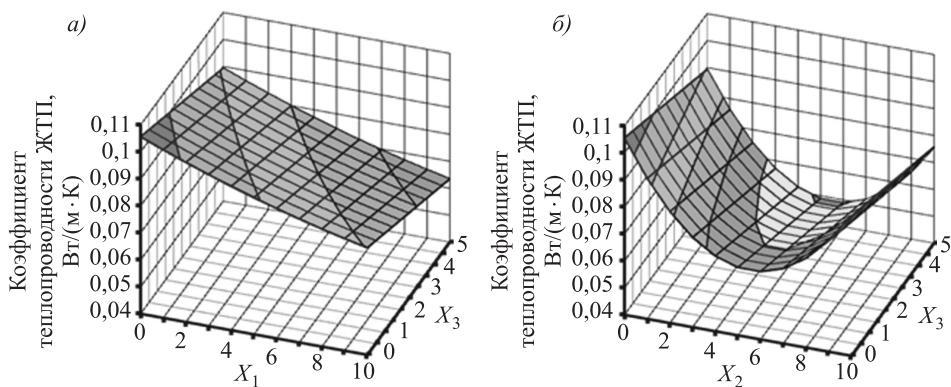


Рис. 1. Изменение коэффициента теплопроводности ЖТП в зависимости от вида (a – необожженный (X_1); b – обожженный (X_2)) и содержания (% от массы связующего) диатомита и белой сажи (X_3) (вид акрилового связующего – Акрэмос-101; содержание стеклосфер – 12,5 % от массы ЖТП)

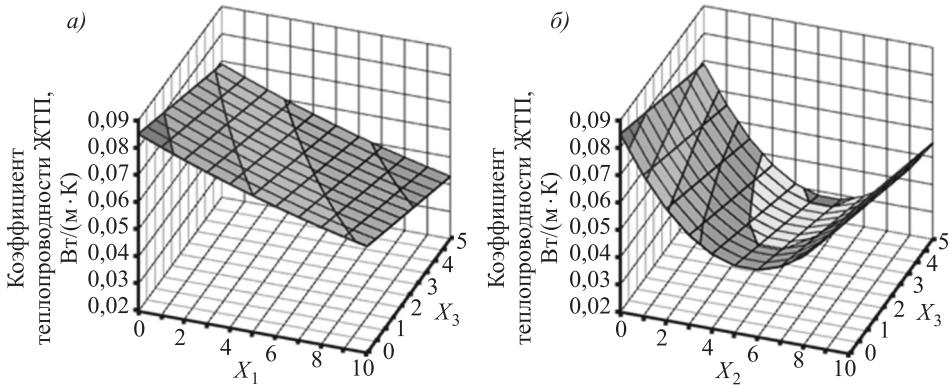


Рис. 2. Изменение коэффициента теплопроводности ЖТП в зависимости от вида (а – необожженный (X_1); б – обожженный (X_2)) и содержания (в % от массы связующего) диатомита и белой сажи (X_3) (вид акрилового связующего – Акрэмос-101; содержание стеклосфер – 17,5 % от массы ЖТП)

17,5%-м содержанием стеклосфер на основе необожженного и обожженного диатомитов составляют соответственно 0,043 и 0,028 Вт/(м×К) по сравнению с аналогичными показателями для покрытий с 12,5%-м содержанием микросфер – 0,063 и 0,049 Вт/(м×К).

Для более наглядного представления влияния доли стеклосфер на теплопроводность ЖТП были построены графические зависимости, представленные на рис. 3. Из анализа полученных данных следует, что повышение содержания микросфер К20 с 12,5 до 17,5 % приводит к снижению теплопроводности соответственно для необожженного и обожженного диатомита в 1,24÷1,48 и 1,24÷1,73 раза. Наибольший эффект для необожженного диатомита проявляется при максимальных исследуемых концентрациях минеральных добавок; в случае замены диатомита на обожженный область максимального снижения коэффициента теплопроводности зафиксирована при содержании диатомита 4,5÷6,5 % и белой сажи 4,5÷5 %.

В ходе исследования для увеличения эластичности покрытия помимо акриловой дисперсии Акрэмос-101 была использована также высокоэластичная дисперсия Эколат-2014. Для составов ЖТП на основе акриловой

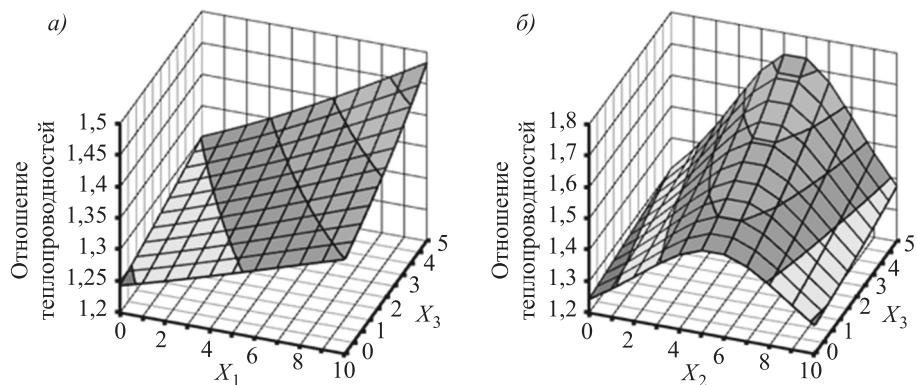


Рис. 3. Изменение отношения коэффициентов теплопроводностей ЖТП с содержанием стеклосфер 12,5 % к 17,5 % в зависимости от вида (а – необожженный (X_1); б – обожженный (X_2)) и содержания (в % от массы связующего) диатомита и белой сажи (X_3) (вид акрилового связующего – Акрэмос-101)

дисперсии Эколат-2014 были получены значения коэффициента теплопроводности, близкие к значениям для составов с Акрэмос-101 как для необожженного, так и для обожженного диатомита, что свидетельствует о незначительном влиянии вида акриловой дисперсии на теплоизоляционные свойства покрытий при прочих равных составляющих смесей.

Из анализа полученных результатов следует, что предварительная высокотемпературная обработка порошка природного диатомита позволяет улучшить теплофизические характеристики жидких теплоизоляционных покрытий. Замена обычного диатомита обожженным позволяет получать составы с более низким коэффициентом теплопроводности, что является одним из основных показателей теплоизоляционных покрытий. За счет использования в составах ЖТП обожженного диатомита появляется возможность применения более устойчивых к раздавливанию микросфер марки K20 (3M Glass Bubbles), повысив тем самым технологичность при изготовлении составов и нанесении теплоизоляционных покрытий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. И нин А.Е., Низина Т.А., Неверов В.А. Разработка эффективных составов наполненных полимерных связующих для жидких теплоизоляционных покрытий // Разработка эффективных авиационных, промышленных, электротехнических и строительных материалов и исследование их долговечности в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013. С. 158–162.
2. Низина Т.А., И нин А.Е. Разработка жидких энергосберегающих покрытий на основе местных минеральных наполнителей // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всерос. науч.-техн. конф. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. С. 89–94.
3. Низина Т.А., И нин А.Е. Энергоэффективные жидкие теплоизоляционные покрытия на основе полых микросфер и тонкодисперсных минеральных наполнителей // Региональная архитектура и строительство. 2015. № 4. С. 33–42.
4. Селяев В.П., Осипов А.К., Неверов В.А., Куприяшкина Л.И., Маштаев О.Г., Сидоров В.В. Теплоизоляционные свойства материалов на основе тонкодисперсных минеральных порошков // Строительные материалы. 2013. № 1. С. 61–63.
5. Селяев В.П., Неверов В.А., Куприяшкина Л.И., Колотушкин А.В., Сидоров В.В. Микроструктура перспективных теплоизоляционных материалов на основе диатомитов Среднего Поволжья // Региональная архитектура и строительство. 2013. № 1(15). С. 12–18.
6. Дистанов У.Г. Кремнистые породы СССР. Казань: Татар. изд-во, 1976. 412 с.

Низина Татьяна Анатольевна, д-р техн. наук, доц.; E-mail: nizinata@yandex.ru
Национально-исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Инин Андрей Евгеньевич, асп.; E-mail: sucre90@mail.ru
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Неверов Вячеслав Александрович, канд. физ.-мат. наук, доц.; E-mail: ua4uu@yandex.ru
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Получено 15.12.15

Nizina Tat'yana Anatol'evna, DSc, Ass. Professor; E-mail: nizinata@yandex.ru
Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Inin Andrey Evgen'evich, Post-graduate Student; E-mail: sucre90@mail.ru
Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Neverov Vyacheslav Alexandrovich, PhD, Ass. Professor; E-mail: ua4uu@yandex.ru
Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

INFLUENCE OF DIATOMITE FIRING ON THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF LIQUID THERMAL INSULATION COATINGS

The article presents the results of experimental studies of thermal conductivity of liquid thermal insulation coatings, obtained on the basis of fine mineral fillers (burnt and unburnt diatomite, white carbon) and glass microspheres. Acrylic dispersions Akremos-101 and Ekolat-2014 were used as the basic binders. The results of the conducted research revealed the influence of diatomite thermal pretreatment at 550 °C for 5 hours on the thermophysical properties of liquid thermal insulation coatings. The compositions are optimized for the content of fine mineral fillers, hollow glass microspheres, and the type of acrylic dispersion considering the production of coatings with minimal thermal conductivity coefficients.

К e y w o r d s: energy saving, thermal insulation, mineral powders, diatomite, glass microspheres, white carbon, thermal conductivity.

REFERENCES

1. Inin A.E., Nizina T.A., Neverov V.A. Razrabotka effektivnykh sostavov napolnennykh polimernykh svyazuyushchikh dlya zhidkikh teploizolyatsionnykh pokrytiy [Development of effective formulations of filled polymeric binders for liquid thermal insulating coatings]. Razrabotka effektivnykh aviatcionnykh, promyshlennykh, elekrotehnicheskikh i stroitel'nykh materialov i issledovanie ikh dolgovechnosti v usloviyah vozdeystviya razlichnykh ekspluatatsionnykh faktorov: materialy Mezhdyn. Nauch.-tekhn. konf. [Development of effective aviation, industrial, electrotechnical and building materials and testing their durability in conditions of impact of various operational factors: proceedings of the international scientific.-tech. conf.]. Saransk, Publisher Mordovia State University, 2013. Pp. 158–162. (in Russia)
2. Nizina T.A., Inin A.E. Razrabotka zhidkikh energosberegayushchikh pokrytiy na osnove mestnykh mineral'nykh napolniteley [Development of liquid energy-saving coatings on the basis of local mineral fillers.] Dolgovechnost' stroitel'nykh materialov, izdeliy i konstruktsiy: materialy Vseros. nauch.-tekhn. konf. [Durability of building materials, products and constructions: proceedings All-Russia of. scientific.-tech. conf.]. Saransk, Publisher Mordovia State University, 2014. Pp. 89–94. (in Russia)
3. Nizina T.A., Inin A.E. Energoeffektivnye zhidkie teploizolyatsionnye pokrytiya na osnove polykh mikrosfer i tonkodispersnykh mineral'nykh napolniteley [Energy-efficient liquid thermal insulation coatings based on hollow microspheres and a fine-disperse mineral powders]. Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo [Regional architecture and construction]. 2015. No. 4. Pp. 33–42. (in Russia)
4. Selyaev V.P., Osipov A.K., Neverov V.A., Kupriyashkina L.I., Mashtaev O.G., Sidorchuk V.V. Teploizolyatsionnye svoystva materialov na osnove tonkodispersnykh mineral'nykh poroshkov [Insulating properties of the materials based on fine-dispersed mineral powders]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2013. No. 1. Pp. 61–63. (in Russia)

5. Selyaev V.P., Neverov V.A., Kupriyashkina L.I., Kolotushkin A.V., Sidorchuk V.V. Mikrostruktura perspektivnykh teploizolyatsionnykh materialov na osnove diatomitov Srednego Povolzh'ya [Microstructure of promising heat-insulating materials based on diatomite of the Middle Volga]. Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo [Regional architecture and construction]. 2013. No. 1(15). Pp. 12–18. (in Russia)
 6. Distanov U.G. Kremnistye porody SSSR [Siliceous rocks of the USSR]. Kazan, Tatar book publishing house, 1976. 412 p. (in Russia)
-

УДК 691.327.002.3

В.Ф. ПАНОВА, С.А. ПАНОВ, А.А. КАРПАЧЕВА

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВТОРИЧНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Описан опыт лаборатории «Строительные материалы» СибГИУ с техногенными породами как сырьем для производства строительных материалов и изделий. Данна классификация ВМР по агрегатному состоянию и по коэффициенту основности. Разработана последовательность исследования отходов. Приведена методика работы с ВМР как с заполнителем бетона и компонентами бесклинкерного цемента. Описаны расчеты состава цемента из вторичных минеральных ресурсов.

Ключевые слова: техногенный продукт, изделие, вторичный минеральный ресурс, переработка, методика, исследование.

Одним из основных направлений снижения материоемкости в производстве строительных материалов является применение вторичных минеральных ресурсов (ВМР). В лаборатории «Строительные материалы» Сибирского государственного индустриального университета изучались различные техногенные продукты металлургии: отходы литейного производства и газоочистки; отходы рудо- и углеобогащения; горелые породы; промышленные отходы энергетики; отходы горно- и угледобывающей промышленности и др. К настоящему времени накоплен и обобщен опыт работы с техногенными продуктами для применения их в производстве строительных материалов и изделий [1–4].

Цель настоящей работы – описать разработанный системный подход исследования и использования ВМР как сырья для производства строительных материалов и изделий.

Для оценки ВМР как строительного сырья, по нашему мнению, наиболее эффективны классификации по агрегатному состоянию и по коэффициенту основности. Такое разделение дает возможность уже на начальном этапе, зная химический состав пород, определить направление их применения в стройиндустрии.

Классификация ВМР по агрегатному состоянию:

– группа А – продукты, не утратившие природных свойств (карьерные остатки при добыче пород, например, отходы обогащения руды и угля). Это природные материалы, не претерпевшие физико-химических изменений;

– группа Б – отходы, образовавшиеся в результате глубоких физико-химических и термических процессов. Это продукты, полученные при высоких температурах или из расплава скоростного или медленно охлажденного, а также из растворов солей. Эти продукты обладают скрытой энергией, активностью, являются наиболее приемлемым сырьем для стройиндустрии, например, для получения бесклинкерных цементов;

– группа В – продукты, образовавшиеся при длительном хранении в шлаконаполнителях, продукты распада или самопроизвольного самообжига, например, горелые породы, лежалые сталеплавильные шлаки.

Для установления пригодности применения промышленных отходов в производстве строительных материалов и изделий предлагается поэтапная работа с ними (рис. 1). Сначала необходимо оценить агрегатное состояние и объемы накопления техногенного продукта, а также однородность и эко-



Рис. 1. Этапы исследования промышленных отходов

номичность его изучения и последующего применения (этап 1). Далее проверяется экологичность: радиоактивность и токсичность (этап 2). На этапе 3 определяются основные показатели ВМР как сырья: вещественный, химический, минералогический состав, которые дают возможность найти содержание органических и минеральных компонентов, изучить их активность, сделать предварительную оценку применения, например, рассчитав коэффициент основности (рис. 2). Отдельные ВМР можно предложить для производства строительных материалов как основное сырье, другие могут быть направлены как заполнители, наполнители; компоненты шихты или добавки (этап 4). Далее (этап 5) лабораторные испытания по подбору шихты или проведение расчетов количества компонентов сырья по известным методикам. Оптимальные лабораторные составы для производства строительных материалов требуют апробации в заводских условиях (этап 6). При получении положительных результатов идет разработка и дальнейшее утверждение технологических регламентов и передача их для внедрения на производстве (этап 7).

Через центральную часть рис. 2 проложена шкала изменения коэффициента основности ($K_{\text{осн}}$) от $- \infty$ до $+ \infty$ и разделена на пять зон (от ультраосновных до ультракислых). Над шкалой приведены строительные изделия, получаемые из сырья соответствующим коэффициентом основности. Сырье для отдельных материалов может относиться к одной или двум зонам. Под шкалой приведены наименования техногенных продуктов, коэффициент основности которых находится в определенной зоне.

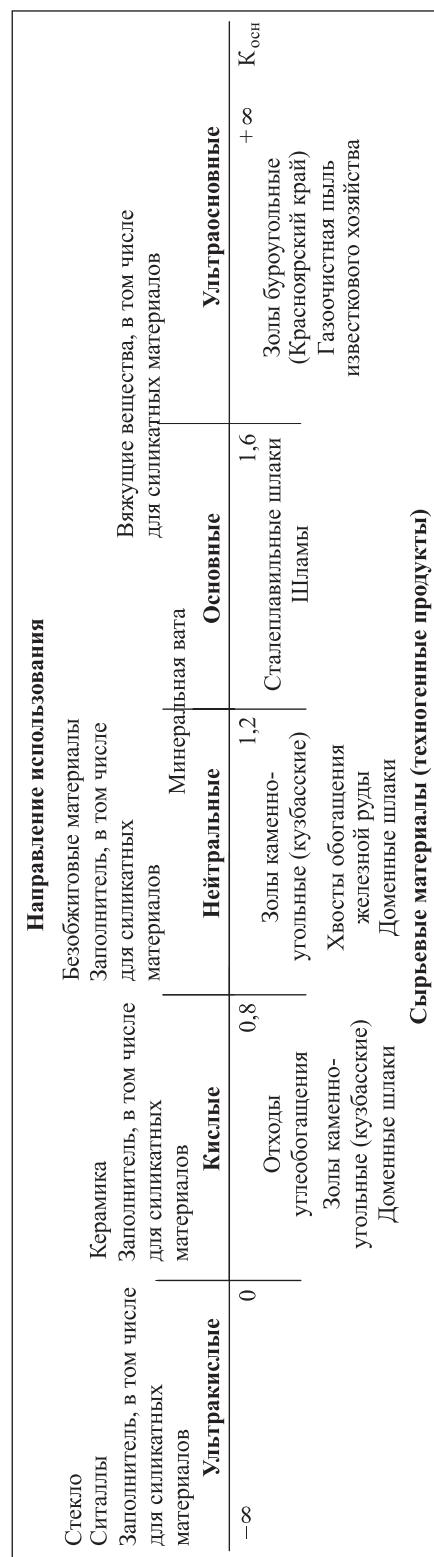


Рис. 2. Определение направления использования технологических продуктов по коэффициенту основности

Экологичность техногенных отходов определяется испытанием их на радиоактивность и токсичность. Проверка материалов на радиоактивность осуществляется по ГОСТ 30108–94 «Материалы и изделия строительные. Эффективная удельная активность естественных радионуклидов». К радиоактивным элементам отнесены радий (Ra^{226}), торий (Th^{232}) и калий (K^{40}). Суммарная эффективная удельная активность естественных радионуклидов $A_{\text{эфф}}$ определяется по формуле

$$A_{\text{эфф}} = A_{Ra} + 1,31A_{Th} + 0,085A_K, \quad (1)$$

где A_{Ra} , A_{Th} и A_K – радиоактивность соответствующего элемента.

Для всех видов строительства, в том числе и жилья, применимы породы с $A_{\text{эфф}} < 370$ Бк/кг.

Содержание токсичных веществ, выделяемых породой в мг на m^3 воздуха, не должно превышать предельно допустимой концентрации (ПДК), указанной в гигиенических нормативах ГН 2.1.6.695–98 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест». К основным токсичным элементам относятся оксиды: MnO_2 , NO_2 , CO , SO_2 , а также мышьяк, пыль, ртуть, свинец; сернистые соединения: PbS , H_2S , H_2SO_4 , SO_2 , CS_2 ; фтор, фтористый, хлористый водород и др.

Однородность техногенных отходов оценивается методом статистической обработки результатов химического и гранулометрического состава представительных проб. Однородность состава промышленных отходов встречается очень редко, особенно при выбрасывании их и хранении в отвалах. Поэтому они требуют дополнительного обогащения и гомогенизации [1].

Одним из основных критерииов при выборе направления использования промышленных отходов является достигаемый экономический эффект. В производстве строительных материалов экономический эффект утилизации 1 т твердых отходов ($\mathcal{E}_{\text{уд}}$) определяют как разность суммарных удельных приведенных затрат на изготовление аналогичных материалов из традиционного сырья и эксплуатацию отвалов и затрат на производство аналогичных материалов из отходов промышленности

$$\mathcal{E}_{\text{уд}} = \left(\frac{n_1}{a} \right) (C_1 + n_2 C_2 - C_3) + E_n (K_1 + n_2 K_2 - K_3), \quad (2)$$

где C_1 и C_3 – себестоимость строительных материалов соответственно из традиционного и утилизируемого сырья;

C_2 – ежегодные затраты на содержание отвалов и транспортировку побочных продуктов;

n_1 – коэффициент, учитывающий долю затрат на данный вид материала в общих затратах на сырье и материалы в себестоимости конструкции;

n_2 – коэффициент, учитывающий частичную или полную ликвидацию отвалов, $n_2 = 0,3-1$;

K_1 и K_3 – удельные капитальные вложения на производство соответственно строительных материалов из традиционного и утилизируемого сырья;

K_2 – капитальные вложения на сооружения отвалов;

E_n – нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений;

a – удельный расход утилизируемого сырья на единицу продукции.

Направленность применения BMP в стройиндустрии вполне реально определяется по значению коэффициента основности (см. рис. 2).

Зная химический состав BMP, можно оценить их свойства по известным модулям:

$$\text{основности } M_o = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3};$$

$$\text{кислотности } M_k = \frac{1}{M_o};$$

$$\text{активности } M_a = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2},$$

по коэффициенту основности (K_{och}):

$$K_{\text{och}} = \frac{(\text{CaO} + 0,93\text{MgO} + 0,6\text{R}_2\text{O}) - (0,55\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,35\text{Fe}_2\text{O}_3 + 0,7\text{SO}_3 + x\text{BnOm})}{(0,93\text{SiO}_2 - y\text{RnOn})}, \quad (3)$$

где CaO, MgO, R₂O, Al₂O₃, Fe₂O₃, SO₃, SiO₂ – содержание соответствующих оксидов, %.

В формуле (3) уменьшаемое в числителе показывает общее содержание щелочных оксидов («условного» оксида кальция – CaO) в сырье, вычитаемое определяет количество CaO, связанного с соответствующими оксидами. Разница между ними составляет количество оставшегося CaO, который при определенных условиях совместно с силикатами (их количество зафиксировано в знаменателе) образует силикаты кальция, одно-, двухосновные.

Для использования исследуемых отходов в качестве заполнителя необходимо проверить их на распад (рассыпание). Известно, что с повышением в составе сырья содержания оксида кальция (CaO), оно склонно к силикатному распаду. Происходит это вследствие перехода двухкальциевого силиката из неустойчивой формы ($\gamma \cdot 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) в стабильное состояние ($\beta \cdot 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), что сопровождается увеличением его объема на 10 %. В результате возникающих внутренних напряжений заполнитель растрескивается и рассыпается. Оценить стойкость BMP к силикатному распаду можно расчетом по формулам:

$$\text{SiO}_{2\min} = \frac{100 - \Sigma\text{RO}}{2,5}; \quad \text{CaO}_{\max} = \frac{100 - \Sigma\text{RO}}{1,8}, \quad (4)$$

где ΣRO – сумма всех оксидов (за исключением содержания CaO и SiO₂), %.

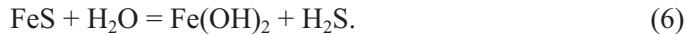
Техногенные продукты стойки к распаду, если $\text{SiO}_{2\min} < \text{SiO}_{2\text{факт}}$, а $\text{CaO}_{\max} > \text{CaO}_{\text{факт}}$. Лабораторный способ проверки на силикатный распад – это пропаривание 4 ч и охлаждение пробы одной фракции с последующим рассевом и взвешиванием.

Известковый распад характерен для отходов, содержащих повышенное количество свободного оксида кальция (CaO), при гидратации которого увеличение объема может быть в 1,5–2,5 раза. Гидратация оксида кальция осуществляется по реакции



Лабораторный способ проверки на известковый распад осуществляется по методике, описанной выше.

Металлический распад происходит вследствие гидратации сернистых соединений металлов (FeS , MnS , ZnS , MeS) под влиянием атмосферной влаги по реакции



Новообразования имеют увеличенный на 38 % объем. Лабораторная проверка осуществляется путем выдерживания пробы одной фракции в дистиллированной воде в течение 30 сут с последующей сушкой, рассевом и взвешиванием прошедших через контрольное сито зерен.

Расчет состава бескликерного цемента из ВМР с применением заданного коэффициента основности шихты. Установлено, что вяжущие свойства проявляются для шихты из природного сырья, имеющей коэффициент основности более единицы. Предложено для искусственной цементной шихты применять породы группы Б, т.е. прошедшие термоактивацию в процессе образования, и ограничить значение $K_{\text{осн}} = 1,2\text{--}1,6$.

Выбирается два вида сырья: с $K_{\text{осн}} < 1$, т.е. с недостатком извести, так называемое «кислое»; с $K_{\text{осн}} > 1$, т.е. с некоторым избытком CaO , «основное». Задается необходимое значение $K_{\text{осн}} - n$. Содержание химических оксидов «основного» компонента записывается в числитель, «кислого» в знаменатель. Необходимо решить уравнение

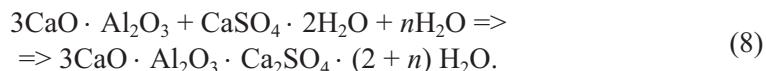
$$\frac{[(\text{CaO} + 0,93\text{MgO} + 0,6\text{R}_2\text{O}) - (n0,93\text{SiO}_2 + 0,55\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,35\text{Fe}_2\text{O}_3 + 0,7\text{SO}_3)]X}{(n0,93\text{SiO}_2 + 0,55\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,35\text{Fe}_2\text{O}_3 + 0,7\text{SO}_3) - (\text{CaO} + 0,93\text{MgO} + 0,6\text{R}_2\text{O})} = 1, \quad (7)$$

где n – заданное для шихты значение $K_{\text{осн}}$;

X – количество массовых частей «основного» компонента с $K_{\text{осн}} > 1$ на одну весовую часть «кислого» ($K_{\text{осн}} < 1$) компонента.

Рассчитывается состав двухкомпонентной шихты для цемента в частях и далее в процентном соотношении.

Расчет количества сульфатного активизатора. Известно, что в состав любого цемента необходимо включить сульфатный активизатор, в качестве которого чаще всего используется гипсовый камень или гипс [5]. Расход гипсового камня для получения цемента зависит от содержания алюминатной составляющей (C_3A или Al_2O_3). Их химическое взаимодействие может приводить к образованию *этtringита* (гидросульфоалюмината кальция) в соответствии с уравнением реакции



Этtringит формируется на первом этапе твердения и имеет увеличенный объем (в 2–7 раз), т.е. обеспечивает некоторое повышение плотности и, как следствие, прочности цементного камня.

Расход гипса определяется по формуле

$$\Gamma = \frac{0,478\sum\text{Al}_2\text{O}_3}{a_\Gamma}, \quad (9)$$

где $\sum\text{Al}_2\text{O}_3$ – содержание в шихте общего Al_2O_3 (%)

$$\Sigma Al_2O_3 = Al_2O_3^{1 ком} \cdot \frac{b_1}{100} + Al_2O_3^{2 ком} \cdot \frac{b_2}{100},$$

здесь $Al_2O_3^{1 ком}$; $Al_2O_3^{2 ком}$ – процентное содержание Al_2O_3 в первом и втором компонентах;

b_1 , b_2 – количество, процент первого и второго компонента в цементе;

a_r – содержание гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) в гипсовом камне, %.

Количество добавки сульфатного активизатора ограничивается по содержанию SO_3 в цементе:

$$\Sigma SO_3^{\text{цем}} = SO_3^\Gamma + SO_3^{1 ком} \cdot \frac{b_1}{100} + SO_3^{2 ком} \cdot \frac{b_2}{100};$$

$$SO_3^\Gamma = \frac{\Gamma}{M_{CaSO_4} \cdot 2H_2O}; \quad \frac{M_{CaSO_4 \cdot 2H_2O}}{M_{SO_3}} = 2,15,$$

$$M_{SO_3}$$

где Γ – содержание гипса в шихте по расчету, %;

SO_3 – содержание сульфатного оксида в гипсе, в первом и втором компонентах, %;

M – молекулярная масса;

b – количество первого и второго компонентов в цементной шихте, %.

Если содержание $SO_3^{\text{цем}}$ будет больше допустимых пределов (ГОСТ 10178–85), то необходимо сделать корректировку расхода гипсового камня.

Примеры расчета состава шихты для получения цемента.

Пример 1. Известково-шлаковый цемент на основе граншлака ОАО «ЕВРАЗ-ЗСМК» (табл. 1).

Необходимо рассчитать (недостающее) количество CaO (извести) для получения цемента с заданным коэффициентом основности шихты ($K_{осн} = 1,6$).

Решается уравнение по формуле 3:

$$1,6 = \frac{(CaO + 0,93 \cdot 6,55) - (0,55 \cdot 10,36 + 0,35 \cdot 0,37)}{(0,93 \cdot 38,8)}.$$

Результат расчета: $CaO = 56,4\%$.

Итак, общее содержание CaO в цементе должно быть 56,4 %. Однако в доменном шлаке его содержание составляет 42,01 % (см. табл. 1), значит необходимо добавить оксид кальция (известь) в количестве $56,4 - 42,01 = 14,4\%$. Итак, добавка извести 14,4 % позволяет получить полноценный известково-шлаковый цемент. Для ускорения реакции необходимо введение добавки сульфатного активизатора.

Таблица 1. Химический состав ВМР металлургии

Наименование сырья	Содержание оксидов, %									
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅
Гранулированный доменный шлак	38,8	0,94	10,36	42,01	6,55	0,37	0,56	0,49	0,62	<0,3
Известковая пыль	3,95	0,05	1,07	61,79	1,21	3,77	0,1	0,3	0,03	–

Пример 2. Известь можно заменить газоочистной пылью известкового производства ОАО «ЕВРАЗ–ЗСМК» (см. табл. 1).

Пыль газоочистки известкового производства относится, как и известь, к высокоосновному компоненту, коэффициент основности которого больше 1 ($K_{\text{осн}} > 1$).

Решается уравнение (7) при $n = 1,6$.

Необходимо определить X количество компонента ($K_{\text{осн}} > 1$), т.е. известковой пыли, на одну часть шлака, для которого ($K_{\text{осн}} < 1$) (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Химический состав сырьевых материалов цемента

Материал	Содержание, %						Кол-во в шихте
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	П.п.п	
Граншлак	39,1	10,64	0,38	43,15	6,73	0	79
Известковая пыль	3,97	1,08	3,78	62,12	1,22	27,83	15
ОФС	89,28	8,04	1,14	0,23	0,21	1,1	6

$$\frac{[(61,79 + 0,93 \cdot 1,21) - (1,6 \cdot 0,93 \cdot 1,21 + 0,55 \cdot 1,07 + 0,35 \cdot 3,77)]X}{(1,6 \cdot 0,93 \cdot 38,07 + 0,55 \cdot 10,36 + 0,35 \cdot 0,37) - (42,01 + 0,93 \cdot 6,55)} = 1,$$

$$\frac{[(61,79 + 1,125) - (1,8 + 0,59 + 1,32)]X}{(56,65 + 5,7 + 0,13) - (42,01 + 6,09)} = 1, \quad X = 0,24.$$

Установлено, что на одну часть доменного гранулированного шлака нужно добавить 0,24 части пыли известкового производства, т.е. шлак – 80,7 %, пыль газоочистки известни – 19,3 %.

Расчет количества сульфатного активизатора известково-шлакового вяжущего, в качестве которого принят гипсовый камень (Γ):

$$\Gamma = \frac{0,478 \cdot \Sigma Al_2O_3}{a_{\Gamma}} \cdot 100 = \frac{0,478 \cdot 10,36}{80} \cdot 100 = 6 \%,$$

где ΣAl_2O_3 – содержание алюминатов в компонентах с учетом их процентного количества в шихте;

a_{Γ} – содержание CaSO₄ · 2H₂O в гипсовой породе (принято 80 %).

Полученные данные близки к результатам лабораторного опыта по оптимизации шихты для шлакового цемента, проведенного методом математического планирования (трехфакторный эксперимент) [6].

Пример 3. Рассчитать коэффициент основности для сырьевой смеси и сделать вывод об использовании ее в качестве цемента.

В состав цемента вошли доменный гранулированный шлак, газоочистная пыль известкового производства и отработанная формовочная смесь (ОФС) – отход литейного производства ОАО «ЕВРАЗ–ЗСМК». ОФС добавляется для активации помола вяжущего. По лабораторным данным ОФС позволяет сократить время помола на 30–40 % для достижения заданной удельной поверхности ($S_{\text{уд}} > 250 \text{ м}^2/\text{кг}$).

Получен оптимальный состав: граншлак – 79 %; пыль газоочистки извести – 15 %; гипсовый камень – 6 % (рис. 3, табл. 3).

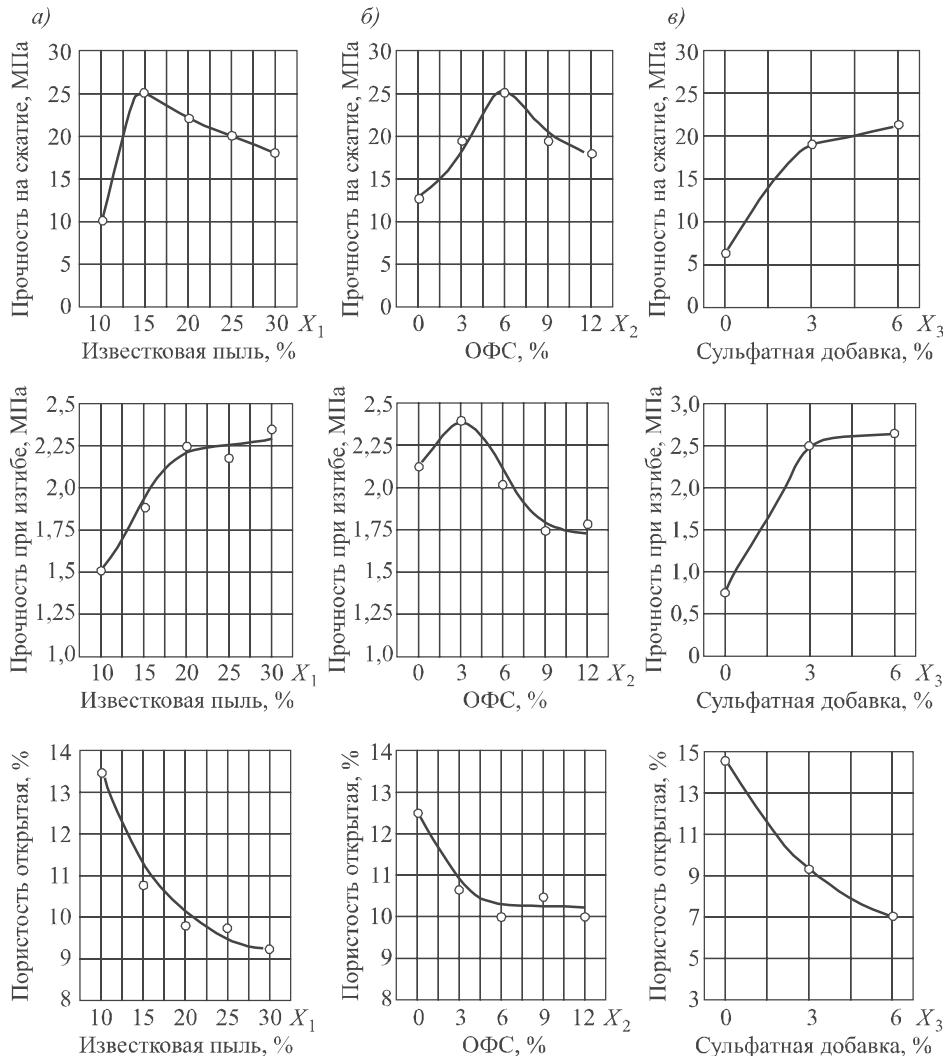


Рис. 3. Оптимизация по прочности вяжущего: при сжатии (a); при изгибе (б); оптимизация состава вяжущего по открытой пористости (в)

Рассчитаем коэффициент основности полученной сырьевой смеси по формуле 3:

$$K_{\text{осн}} = \frac{(CaO + 0,93MgO + 0,6R_2O) - (0,55Al_2O_3 + 0,35Fe_2O_3 + 0,7SO_3 + xBnOm)}{(0,93SiO_2 - yRnOm)},$$

Таблица 3. Химический состав сырьевой смеси шлакового цемента

Компоненты	Содержание, %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	П.п.п.	Σ
Граншлак 79 %	30,89	8,41	0,3	34,09	5,32	0	79,01
Известковая газоочистная пыль 15 %	0,59	0,16	0,57	9,32	0,18	4,17	14,99
ОФС 6 %	5,36	0,48	0,7	0,01	0,01	0,07	6
Состав сырьевой смеси, %	36,84	9,05	0,94	43,42	5,51	4,24	100

$$K_{och} = \frac{(43,42 + 0,93 \cdot 5,51) - (0,55 \cdot 9,05 + 0,35 \cdot 0,94)}{(0,93 \cdot 36,84)} = 1,26.$$

Полученный $K_{och} = 1,26$, что соответствует показателю вяжущего (1,2–6), т.е. лабораторный состав близок к расчетному (см. пример 2).

Активность полученного вяжущего составила 27 МПа при $S_{yd} = 400 \text{ м}^2/\text{кг}$ и добавке сульфатного активизатора (гипса) 6 % (табл. 4).

Состав цемента защищен патентом № 2232139¹.

Таблица 4. Свойства шлакового цемента

Характеристики	Ед. изм.	Свойства
Марка	кг/см ²	250
Состав вяжущего:	%	
граншлак	%	71–79
известковая пыль	%	15–20
ОФС	%	3–6
гипс	%	3
Тонкость помола: остаток на сите № 008	%	3
Удельная поверхность	см ² /г	4000–4500
Водопотребность	%	25–27,5
Истинная плотность	г/см ³	2,6–2,8
Насыпная плотность в рыхлом состоянии	кг/м ³	980–1000
Насыпная плотность в уплотненном состоянии	кг/м ³	1300–1350
Начало схватывания	мин	20–25
Конец схватывания	ч	1–40
Прочность при естественном твердении 7 сут:		
при растяжении на изгиб	МПа	1,72
при сжатии	МПа	10,1
Прочность при естественном твердении 28 сут:		
при растяжении на изгиб	МПа	2,26
при сжатии	МПа	22
Прочность после ТВО $t = 90\text{--}95^\circ\text{C}$, режим (3+8+3) ч:		
при растяжении на изгиб	МПа	2,48
при сжатии	МПа	27,4

Выводы. Разработана модель работы с вторичными минеральными ресурсами (ВМР), поэтапность работы с техногенными породами как сырьем для стройиндустрии показана на примерах. Приведена методика оценки ВМР как заполнителя, т.е. проверки его на силикатный, известковый распад и распад за счет сульфатных соединений металлов.

Показано, что по известному химическому составу техногенного продукта можно рассчитать коэффициент основности и по нему предварительно оценить направленность использования ВМР в стройиндустрии.

¹ Пат. 2232139 РФ, МПК С04В7/14. Декоративный шлаковый цемент / В.С. Фельдман, С.А. Панов, В.Ф. Панова, И.В. Камбалина; № 2002135577/03; заявл. 26.12.2002; опубл. 10.07.2004, Бюл. № 19.

Установлено соответствие результатов расчетного состава шихты для вяжущего через коэффициент основности с результатами лабораторного эксперимента, проведенного методом математического планирования.

Расчетные методики, приведенные в настоящей работе, позволяют оценить техногенные породы как сырье для стройиндустрии, при этом сократить время по сравнению с долгосрочными лабораторными подборками сырьевой шихты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Боженов П.И. Комплексное использование минерального сырья и экология: учеб. пособие. М.: Изд-во АСВ, 1994. 29 с.
2. Панова В.Ф. Строительные материалы на основе отходов промышленных предприятий Кузбасса: учеб. пособие. Новокузнецк: СибГИУ, 2005. 182 с.
3. Панов С.А., Панова В.Ф. Декоративные строительные материалы из обогащенного и активированного шлака: монография. Новокузнецк: СибГИУ, 2010. 216 с.
4. Панова В.Ф. Техногенные продукты как сырье для стройиндустрии: монография. Новокузнецк: СибГИУ, 2009. 289 с.
5. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества: учебник для вузов. М.: Стройиздат, 1986. 464 с.
6. Протодьяконов М.М., Тедер Р.И. Методы рационального планирования эксперимента. М.: Наука, 1975. 44 с.

Панова Валентина Феодосьевна, канд. техн. наук, проф.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

Панов Сергей Александрович, канд. техн. наук, доц.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

Карпачева Анна Анатольевна, канд. техн. наук, доц.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

Получено 17.12.15

Panova Valentina Feodos'evna, PhD, Professor

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Panov Sergey Alexandrovich, PhD, Ass. Professor

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Karpacheva Anna Anatol'evna, PhD, Ass. Professor

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

SYSTEMATIC APPROACH WHEN USING SECONDARY MINERAL RESOURCES IN PRODUCTION BUILDING MATERIALS

The experience of the laboratory «Construction materials» SibSIU with technological species as raw material for the production of building materials and products. A classification of secondary mineral resources in the aggregate state and on the coefficient basicity. Sequence of studies designed waste. The technique works as a secondary mineral resources with aggregate concrete and cement components without clinker. Described calculations of cement from secondary mineral resources.

Key words: technology product, product, secondary mineral resource, recycled, methodology, research.

REFERENCES

1. Bozhenov P.I. Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya i ekologiya: uchebnoe posobie [Complex use of mineral raw materials and ecology: proc. manual]. Moscow, ASV, 1994. 29 p. (in Russia)
 2. Panova V.F. Stroitel'nye materialy na osnove otkhodov promyshlennyykh predpriyatiy Kuzbassa: uchebnoe posobie [Construction materials based on industrial wastes of the enterprises of Kuzbass: proc. manual]. Novokuznetsk, SibSIU, 2005. 182 p. (in Russia)
 3. Panov S.A., Panova V.F. Dekorativnye stroitel'nye materialy iz otbelennogo i aktivirovannogo shlaka: monografiya [Decorative building materials from bleached and activated slag: monograph]. Novokuznetsk, SibSIU, 2010. 216 p. (in Russia)
 4. Panova V.F. Tekhnogennye produkty kak syr'e dlya stroyindustrii: monografiya [Anthropogenic products as raw material for construction industry: monograph]. Novokuznetsk, SibSIU, 2009. 289 p. (in Russia)
 5. Volzhenskiy A.V. Mineral'nye vyazhushchie veshchestva: uchebnik dlya vuzov [Mineral binding substances: textbook. for universities]. Moscow, Stroyizdat, 1986. 464 p. (in Russia)
 6. Protod'yakonov M.M., Teder R.I. Metody ratsional'nogo planirovaniya eksperimenta [Rational methods of planning of experiment]. Moscow, Nauka, 1975. 44 p. (in Russia)
-

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 627.824 : 624.131.6

Х. ФАЙЗИЕВ, С.Н. БАБАКАЕВ, М.У. НОРМАТОВ

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ ФИЛЬТРАЦИИ В ГРУНТОВЫХ ПЛОТИНАХ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ

Приводятся решения задачи неустановившейся фильтрации в грунтовых плотинах методом конечных разностей. Разработан алгоритм решения задачи неустановившейся фильтрации и составлена программа расчета на языке C#. Возможности разработанной методики, программы расчета неустановившейся фильтрации и оценка достоверности получаемых результатов иллюстрируются на примере фильтрационных задач.

Ключевые слова: грунтовые плотины, фильтрация, неустановившаяся фильтрация, быстрое снижение уровня воды в верхнем бьефе, скорость снижения уровня воды, метод конечных разностей.

Проблема вредного воздействия фильтрационного потока в плотинах из местных материалов на сегодняшнее время все еще остается актуальной. Особенно это относится к сооружениям, находящимся в условиях сезонной эксплуатации водохранилищ с большой амплитудой колебания уровня верхнего бьефа. Изменение уровней бьефов вызывает изменение положения депрессионной поверхности и параметров фильтрационного потока (фильтрационных градиентов, скоростей, расходов). Анализ работы верхнего клина плотины при быстром опорожнении водохранилища показал, что его устойчивость значительно снижается за счет действия гидродинамических сил, направленных в сторону верхнего бьефа.

Задача неустановившейся фильтрации является одной из наиболее сложных в области теории фильтрации. Впервые общие уравнения неустановившейся фильтрации были предложены Н.Е. Жуковским [1].

Однако из-за значительной сложности решения эти уравнения были использованы гораздо позднее.

Упрощенный вывод уравнения неустановившейся фильтрации был предложен Й. Буссинеском [1]. Его допущение заключается в том, что горизонтальные скорости фильтрационного потока по вертикали, которые легли в основу гидравлической теории неустановившейся фильтрации, постоянны. Дальнейшее развитие вопроса о расчете неустановившейся фильтрации нашел в работах П.Я. Полубариновой-Кочиной, В.И. Аравина и С.Н. Нумерова, Н.Н. Веригина, В.С. Лукьянова, В.М. Шестакова, В.П. Недриги, А.Л. Можевитдинова и А.Г. Сулейманова, Л.Н. Рассказова, Н.А. Анискина, Ф.Б. Абуталиева, Х. Файзиева, С.Н. Бабакаева и др.

Все решения задач неустановившейся фильтрации, решаемые аналитическими, гидравлическими и аналоговыми методами, выполнены при определенных ограничениях: показаны простейшие типы плотин или ведет-

ся расчет, считая в каждом конкретном случае снижение уровня воды мгновенным или рассматривая неустановившийся поток как последовательную смену установившихся состояний. Естественно, что эти методики не равноценны между собой. Каждая из них имеет свои границы применения и лишь в их пределах обеспечивается необходимая точность. Поэтому в общих случаях они служат лишь для оценок в первом приближении. Некоторые, дающие более точные решения, практически мало используются вследствие сложности получаемых зависимостей.

При горизонтальном водоупоре и постоянном коэффициенте фильтрации среды нелинейное уравнение Буссинеска для одномерной задачи принимает вид [1]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{K_t}{\mu} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(h \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где h – гидродинамический напор; x – абсцисса точки кривой депрессии; t – текущее время; K_t , μ – коэффициенты фильтрации и водоотдачи грунта.

Для решения уравнения (1) было предложено несколько приближенных способов, в том числе способ линеаризации [1].

На сегодняшний день качественно более высокий уровень решения подобных задач достигается с помощью численных методов и, прежде всего, с помощью метода конечных разностей.

Ниже мы приводим решения уравнения Буссинеска численным методом конечных разностей. При этом уравнение (1) имеет следующие начальные граничные условия:

$$h|_{t=0} = h_{cp}, \quad (2)$$

$$(1-\alpha_1)(h(0,t)|_{x=0} - h_{cp}) + \alpha_1 \frac{\partial h}{\partial x}|_{x=0} = 0, \quad (3)$$

$$(1-\alpha_2)(h(L,t)|_{x=L} - h_{cp}) + \alpha_2 \frac{\partial h}{\partial x}|_{x=L} = 0, \quad (4)$$

где h_{cp} – средний гидродинамический напор;

x , t – переменные величины;

α_1 , α_2 – соответствующие параметры, принимающие значения 0 или 1, для граничных условий 1-го и 2-го рода.

Для решения уравнения (1) с начальными и граничными условиями (2)–(4) используем метод конечных разностей [2]. Для этого переходим к безразмерным переменным:

$$h^* = \frac{h}{h_{cp}}, \quad x^* = \frac{x}{L}, \quad t^* = \frac{t}{t_m}, \quad a^* = \frac{K_t h_{cp}}{\mu},$$

$$h = h^* \cdot h_{cp}, \quad x = x^* \cdot L, \quad t = t^* \cdot t_m, \quad \alpha = a^*.$$

Подставляя эти безразмерные величины в уравнение (1), получим удобные для решения безразмерные дифференциальные уравнения:

$$\frac{\partial^2 (h^* \cdot h_{cp})}{\partial (x^* \cdot L)^2} = a^* \frac{\partial (h^* \cdot h_{cp})}{\partial (t^* \cdot t_m)},$$

$$\frac{h_{\text{cp}}}{L^2} \cdot \frac{\partial^2 h^*}{\partial x^{*2}} = \alpha \frac{h_{\text{cp}}}{t_m} \frac{\partial h^*}{\partial t^*}.$$

В последнем уравнении обозначим $\frac{\partial^2 h^*}{\partial x^{*2}} = \frac{\alpha L^2}{t_m} \cdot \frac{\partial h^*}{\partial t^*}$; $\frac{1}{x} = \frac{\alpha L^2}{t_m}$ и получим

$$\frac{\partial^2 h^2}{\partial x^{*2}} = \frac{1}{x} \frac{\partial h^*}{\partial t^*}. \quad (5)$$

Для решения уравнения (5) с начальными и граничными условиями (2)–(4) построим сетку:

$$\begin{cases} x_i = x_{i-1} + \Delta x, \quad x_0 = 0, \quad x_N = 1, \quad \Delta x = \frac{1}{n}, \\ i = 1, \quad \overline{n-1}; \quad t_k = t_{k-1} + \Delta t, \quad t_0 = 0, \quad t_k = 1, \quad \Delta t = \frac{1}{k}. \end{cases}$$

В дальнейших расчетах для удобства переменные запишем без звездочки. Производные первого порядка аппроксимируем следующим образом:

$$\frac{\partial h}{\partial k} \approx \frac{h_{i+1} - h_{i-1}}{2\Delta x} + 0(\Delta x), \quad \frac{\partial h}{\partial k} = \frac{h_{i+1} - h_i}{\Delta x} + 0(\Delta x), \quad \frac{\partial h}{\partial k} \approx \frac{h_i - h_{i-1}}{\Delta x} + 0(\Delta x).$$

Для аппроксимации производного второго порядка используем формулу Тейлора:

$$h_{i+1} = h_i + \frac{\partial h}{\partial x} /_{x=0} \Delta x + \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} /_{x=0} \frac{(\Delta x)^2}{2} + \dots, \quad (6)$$

$$h_{i-1} = h_i - \frac{\partial h}{\partial x} /_{x=0} \Delta x + \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} /_{x=0} \frac{(\Delta x)^2}{2} + \dots. \quad (7)$$

Суммируя уравнения (6) и (7), получим

$$\frac{h_{i+1} - 2h_i + h_{i-1}}{(\Delta x)^2} = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}.$$

В уравнении (5) производные первого и второго порядка заменим конечно-разностным соотношением:

$$\frac{h_{i+1} - 2h_i + h_{i-1}}{(\Delta x)^2} = \frac{1}{x} \frac{h_i - \bar{h}_i}{\Delta t},$$

$$h_{i+1} - 2h_i + h_{i-1} = \frac{\Delta x^2}{x \Delta t} (h_i - \bar{h}_i),$$

$$h_{i+1} - 2h_i - \frac{\Delta x^2}{x \Delta t} h_i = -\frac{\Delta x^2}{x \Delta t} \bar{h}_i,$$

$$h_{i+1} - \left(2 - \frac{\Delta x^2}{x \Delta t}\right) h_i + h_{i-1} = -\frac{\Delta x^2}{x \Delta t} \bar{h}_i.$$

Вводя некоторые обозначения, будем иметь следующие системы алгебраических уравнений:

$$a_i h_{i+1} - b_i h_i + c_i h_{i-1} = -d_i, \quad i = \overline{1, n-1}, \quad (8)$$

где

$$a_i = c_i = 1, \quad b_i = 2 - \frac{\Delta x^2}{x \Delta t}, \quad d_i = \frac{\Delta x^2}{x \Delta t} \bar{h}_i, \quad i = \overline{1, n-1}.$$

Уравнения (8) решаем методом прогонки, используя следующие рекуррентные формулы:

$$h_0 = A_0 h_1 + B_0, \quad (9)$$

$$h_i = A_i h_{i+1} + B_i, \quad i = \overline{1, n-1}, \quad (10)$$

где A_0, B_0, A_i, B_i — коэффициенты прогонки.

Если в (3) $\alpha_1 = 0$, то тогда коэффициенты прогонки определяем следующим образом.

При $A_0 = 0, B_0 = h_0, P_0 = A_0 h_1 + B_0, \alpha_1 = 1$ для $i = 1$:

$$h_1 = h_0 + \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=0} \Delta x + \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \Big|_{x=0} \frac{(\Delta x)^2}{2} + \dots,$$

$$h_1 - h_0 - 0.5(h_2 - 2h_1 + h_0) = \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=0} \Delta x = 0,$$

$$2h_1 - 2h_0 - h_2 + 2h_1 - h_0 = 0,$$

$$4h_1 - 3h_0 - h_2 = 0, \quad h_2 = 4h_1 - 3h_0, \quad (11)$$

$$a_1 h_2 - b_1 h_1 + c_1 h_0 = -d_1. \quad (12)$$

При $i = 1$, подставляя (11) в уравнение (12), получим зависимости для коэффициентов прогонки:

$$a_1(4h_1 - 3h_0) - b_1 h_1 + c_1 h_0 = -d_1,$$

$$4a_1 h_1 - 3a_1 h_0 - b_1 h_1 + c_1 h_0 = -d_1,$$

$$(4a_1 - b_1)h_1 - (3a_1 - c_1)h_0 = -d,$$

$$(3a_1 - c_1)h_0 = (4a_1 - b_1)h_1 + d_1,$$

$$h_0 = \frac{4a_1 - b_1}{3a_1 - c_1} h_1 + \frac{d_1}{3a_1 - c_1}, \quad h_0 = A_0 h_1 + B_0.$$

Находим коэффициенты прогонки:

$$A_0 = \frac{4a_1 - b_1}{3a_1 - c_1}, \quad B_0 = \frac{d_1}{3a_1 - c_1}.$$

В общем случае коэффициенты прогонки определяются по следующей формуле:

$$A_i = \frac{d_i}{b_i - c_i A_{i-1}}, \quad B_i = \frac{c_i B_{i-1} + d_i}{b_i - c_i A_{i-1}}, \quad i = \overline{1, n-1}. \quad (13)$$

Если из начальных условий (4) $\alpha_2 = 0$, то $h_N = 1$.

Если $\alpha_2 = 1$, тогда:

$$h_{N-1} = h_N - \frac{\partial h}{\partial x} /_{x=N} \Delta x + \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} /_{x=N} \frac{(\Delta x)^2}{2} + \dots,$$

$$h_N - h_{N-1} + 0.5(h_N - 2h_{N-1} + h_{N-2}) = 0,$$

$$2h_N - 2h_{N-1} + h_N - 2h_{N-1} + h_{N-2} = 0,$$

$$3h_N - 4h_{N-1} - h_{N-2} = 0.$$

Используем следующие рекуррентные формулы:

$$h_{N-1} = A_{N-2}h_N + B_{N-1},$$

$$\begin{aligned} h_{N-2} &= A_{N-2}h_{N-1} + B_{N-2} = A_{N-2}(A_{N-1}h_N + B_{N-1}) + B_{N-2} = \\ &= A_{N-2}A_{N-1}h_N + A_{N-2}B_{N-1} + B_{N-2}, \end{aligned}$$

$$3h_N - 4h_{N-1} + A_{N-2}A_{N-1}h_N + A_{N-2}B_{N-1} + B_{N-2} = 0,$$

$$3h_N - 4h_{N-1}h_N + A_{N-2}A_{N-1}h_N = 4B_{N-1} + A_{N-2}B_{N-1} - B_{N-2},$$

$$(3 - 4h_{N-1} + A_{N-2}A_{N-1})h_N = 4B_{N-1} + A_{N-2}B_{N-1} - B_{N-2}.$$

При $i = N$ для h_n находим

$$h_N = \frac{4B_{N-1} - A_{N-2}B_{N-1} - B_{N-2}}{3 - 4A_{N-1} + A_{N-2}A_{N-1}}. \quad (14)$$

Если $\alpha_1 = 0$, тогда h_0 и $\alpha_1 = 1$:

$$A_0 = \frac{4a_1 - b_1}{3a_1 - c_1}, \quad B_0 = \frac{d_1}{3a_1 - c_1}.$$

При $i = \overline{1, n-1}$ коэффициенты прогонки определяем с помощью (8):

$$a_i h_{i+1} - b_i h_i + c_i(A_{i-1}h_i + B_{i-1}) = -d_i,$$

$$a_i h_{i+1} - b_i h_i + c_i A_{i-1}h_i + c_i B_{i-1} + d_i = 0,$$

$$a_i h_{i+1} - (b_i + c_i A_{i-1})h_i + c_i B_{i-1} + d_i = 0,$$

$$(b_i - c_i A_{i-1})h_i = a_i h_{i+1} + c_i B_{i-1} + d_i,$$

$$h_i = \frac{d_i}{b_i - c_i A_{i-1}} h_{i+1} + \frac{c_i B_{i-1} + d_i}{b_i - c_i A_{i-1}}, \quad h_i = A_i h_{i+1} + B_i, \quad i = \overline{1, n-1},$$

$$A_i = \frac{d_i}{b_i - c_i A_{i-1}}, \quad B_i = \frac{c_i B_{i-1} + d_i}{b_i - c_i A_{i-1}}, \quad i = \overline{1, n-1}.$$

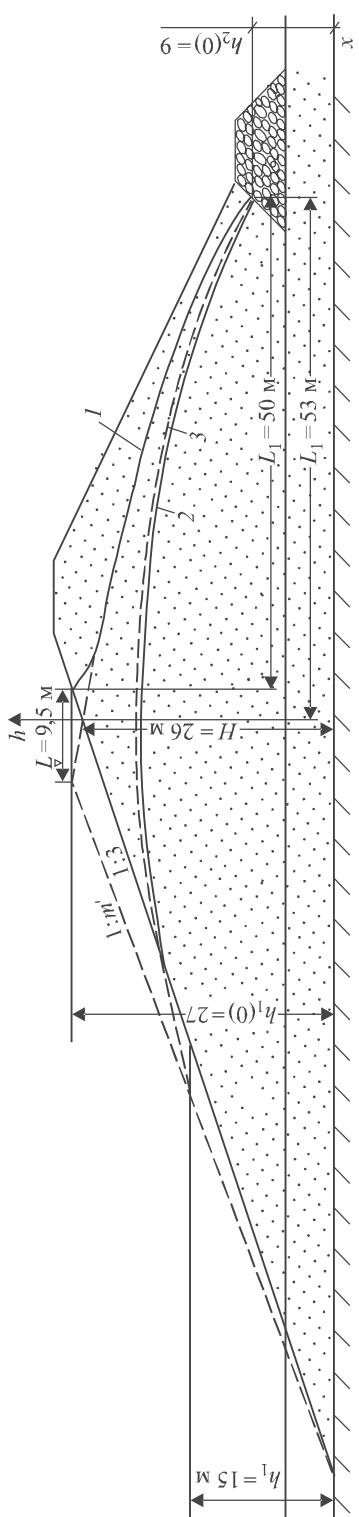
$$\text{Если } i = 1, \text{ тогда: } A_1 = \frac{a_1}{b_1 - c_1 A_0}, \quad B_1 = \frac{c_1 B_0 + d_2}{b_1 - c_1 A_0}.$$

Величины A_0, B_0 определяем из граничных условий (3).

$$\text{Если } i = 2, \text{ тогда: } A_2 = \frac{a_2}{b_2 - c_2 A_1}, \quad B_2 = \frac{c_2 B_1 + d_2}{b_2 - c_2 A_1}.$$

$$\text{При } i = n-1, A_{n-1} = \frac{a_{n-1}}{b_{n-1} - c_{n-1} A_{n-2}}, \quad B_{n-1} = \frac{c_{n-1} B_{n-2} + d_{n-1}}{b_{n-1} - c_{n-1} A_{n-2}}.$$

Таким образом, по прямой прогонке из начальных и граничных условий (2), (3) определяются прогоночные коэффициенты. Обратной прогонкой по граничному условию (4) определяются значения функции



Результаты расчетов неустановившейся фильтрации
1 – начальная кривая депрессии при $t = 0$; 2 – положения депрессионной поверхности по методике В.С. Шестакова при $t = 20$ сут
депрессионной поверхности по МКР при $t = 20$ сут

$$h_i - A_i h_{i+1} + B_i, \quad i = \overline{N-1,1}.$$

Погрешность аппроксимации задачи имеет порядок $(h^2 + \tau)$, где $h = \max(\Delta x)$, $\Delta x = 1/n$. Вычислительная схема является устойчивой во времени и сводится к решению задачи при h и τ , стремящихся к нулю [2].

На основе изложенного метода решения краевой задачи [3, 4] и численных экспериментов по апробации его на компьютере построен алгоритм расчета.

Программа расчета, составленная на языке C#, заключается в выполнении следующих вычислительных операций:

1. Начало программы.
2. Ввод исходных данных.
3. Ввод начального значения напора.

Организация первого этапа цикла по времени ($t = 0$, $t = t + 0.5\tau$).

1. Вычисление коэффициентов разностных уравнений a_i, b_i, c_i и $d_i (i = \overline{1, n-1})$.
 2. Расчет коэффициентов прямой прогонки E_0, B_0 .
 3. Определение коэффициентов прямой прогонки в остальных точках ($i = \overline{1, n-1}$).
 4. Вычисление H_i при $i = n$.
 5. Расчет поля напоров $H_n (i = \overline{n-1,1})$.
 6. Обновление старых значений новыми $\bar{H}_i = H_i (i = \overline{0, N})$.
 7. Проверка условия по времени ($t \leq T$). Если условие по времени выполняется, то конец программы, а если нет, то управление передается на 4.
 8. Конец программы.
- Разработанные методика и программа расчета позволяют решать

задачу неустановившейся фильтрации в грунтовых плотинах без дренаажа и различными дренажами (дренажной призмой, трубчатым дренаажем, наслонным дренаажем и др.) с непроницаемым и проницаемым основаниями.

Возможности разработанных методики и программы расчета неустановившейся фильтрации и оценка достоверности получаемых результатов иллюстрируются ниже на примере фильтрационных задач [5, с. 133–134].

Рассматривалась однородная земляная плотина с проницаемым основанием. Начальная глубина верхнего бьефа $h_1(0) = 27$ м; заложение верхового откоса $m_1 = 3$; низового откоса $m = 2$; коэффициент фильтрации грунта тела плотины и основания $K_t = K_{\text{осн}} = 0,44$ м/сут; коэффициент водоотдачи грунта тела плотины и основания $\mu = 0,2$; скорость сработки уровня воды в водохранилище $v = 0,6$ м/сут, уровень нижнего бьефа принимался неизменным $h_2(0) = 9$ м. В качестве начального условия принималось решение фильтрационной задачи для установившегося режима при глубинах верхнего и нижнего бьефа, равных соответственно 27 и 9 м. Результаты решения данной нестационарной задачи методом конечных разностей и их сравнение с методом В. Шестакова [5] представлены в таблице и на рисунке.

Эти результаты, полученные качественно и количественно, совпадают. Расхождения в отметках депрессионной поверхности в расчетных сечениях не превосходят допустимых пределов.

Результаты расчетов неустановившейся фильтрации для однородных плотин с проницаемым основанием

$X, \text{ м}$	По методу МКР	По методу Шестакова	Отклонение, %
-25	17,8	17,3	2,8
-20	18,7	18,2	2,7
-10	19,8	19,5	1,5
0	19,9	19,7	1,0
10	19,6	19,3	1,5
20	18,8	18,5	1,6
30	17,0	16,6	2,4
40	13,9	13,8	0,7
53	9	9	0

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Полубаринова - Коchin П.Я. Теория движения грунтовых вод. М.: Наука, 1977. 664 с.
- Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1971. 552 с.
- Файзиев Х., Бабакаев С., Хажиев И., Норматов М., Ахмедов И. Численное решение краевой задачи неустановившейся фильтрации в однородных грунтовых плотинах методом конечных разностей // Архитектура. Строительство. Дизайн. 2013. № 3. С. 52–56.
- Файзиев Х., Бабакаев С., Хажиев И.О. Расчет неустановившейся фильтрации в однородных грунтовых плотинах с проницаемым основанием // Вестн. ТИИЖТ. 2014. № 1. С. 21–25.
- Гидротехнические сооружения: справочник проектировщика/ под ред. В.П. Недриги. М.: Стройиздат, 1983. 543 с.

Файзиев Хомитхон, канд. техн. наук, доц.; E-mail: Xomitxon@mail.ru

Ташкентский архитектурно-строительный институт, Узбекистан

Бабакаев Сали Нафасович, канд. техн. наук, доц.

Ташкентский архитектурно-строительный институт, Узбекистан

Норматов Миркомил Усманкулович, ассист.; E-mail: mirkomiln@mail.ru
Ташкентский архитектурно-строительный институт, Узбекистан

Получено после доработки 16.12.15

Fayziev Khomitkhon, PhD, Ass. Professor; E-mail: Xomitxon@mail.ru

Tashkent Architecture Construction Institute, Uzbekistan

Babakaev Sali Nafasovich, PhD, Ass. Professor

Tashkent Architecture Construction Institute, Uzbekistan

Normatov Mirkomil Usmankulovich, Assistant; E-mail: mirkomiln@mail.ru

Tashkent Architecture Construction Institute, Uzbekistan

NUMERICAL SOLUTION OF THE PROBLEM OF UNSTEADY FILTRATION IN EARTH DAMS FINITE DIFFERENCE METHOD

This article describes the solution of problem of unsteady filtration in earth dams finite difference method. An algorithm for solving the problem of unsteady filtration, a program based on C#. Features of the developed technique, a program for calculating unsteady filtration and evaluation of the reliability of the results illustrated by the example of filtration problems.

К e y w o r d s: groundwater dam, filtration, unsteady filtration, the rapid decline in the water level upstream, the rate of decline of the water level, the finite difference method.

REFERENCES

1. Polubarinova-Kochina P.Ya. Teoriya dvizheniya gruntu v vodakh [Theory of movement of groundwater]. Moscow, Science, 1977. 664 p. (in Russia)
2. Samarskiy A.A. Vvedenie v teoriyu raznostnykh skhem [Introduction to the theory of differential circuits]. Moscow, Science, 1971. 552 p. (in Russia)
3. Fayziev Kh., Babakaev S., Hazhiev I., Normatov M., Akhmedov I. Chislennoe reshenie kraevoy zadachi neustanovivsheysya fil'tratsii v odnorodnykh gruntu v plotinakh metodom konechnykh raznostey [Numerical solution of the problem of unsteady filtration in the homogeneous earth dam finite difference method]. Arkhitektura. Stroitel'stvo. Dizayn [Architecture. Building. Design]. 2013. No. 3. Pp. 52–56. (in Russia)
4. Fayziev Kh., Babakaev S., Hazhiev I.O. Raschet neustanovivsheysya fil'tratsii v odnorodnykh gruntu v plotinakh s pronitsaemym osnovaniem [Calculation unsteady filtration in homogeneous earth dam with a permeable base]. Vestnik Tashkentskogo instituta inzhenerov zheleznodorozhnoho transporta [Herald of Tashkent Institute of Railway Engineering]. 2014. No. 1. Pp. 21–25. (in Russia)
5. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya: spravochnik proektirovshchika; pod red. V.P. Nedrigi [Waterworks: directory designer, ed. V.P. Nedrigi]. Moscow, Stroyizdat, 1983. 543 p. (in Russia)

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 697.971

Е.Н. ОСИПОВ, В.П. ШАЦКИЙ, Н.Г. СПИРИНА

К ВОПРОСУ О ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИИ ПОТОКОВ ВОЗДУХА В ПЛАСТИНЧАТЫХ ВОДОИСПАРИТЕЛЬНЫХ ОХЛАДИТЕЛЯХ РЕКУПЕРАТИВНОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ

Рассматривается моделирование выбора некоторых геометрических параметров рекуперативных пластинчатых противоточных водоиспарительных охладителей с целью достижения максимальной холодопроизводительности. Обосновывается возможность получения оптимального значения перераспределения основного и вспомогательного потоков воздуха за счет обоснования аэродинамического сопротивления выходной решетки, что позволяет отказаться от включения в систему охлаждения дополнительного вентиляторного блока для отвода вспомогательного потока воздуха.

Ключевые слова: противоточный рекуперативный водоиспарительный охладитель, аэродинамические сопротивления, моделирование, система уравнений, холодопроизводительность.

Достижение допустимых температурно-влажностных параметров микроклимата на рабочем месте, а также технологических норм на производстве требует привлечения охладительных устройств локального и общего действия. Применение конкретных установок должно быть экономически оправдано и осуществлено при учете строительно-монтажных, эксплуатационных, технологических требований и требований экологической безопасности.

Нельзя не отметить существенные преимущества, которыми обладают водоиспарительные кондиционеры. Они просты по конструкции и в эксплуатации, экологически безвредны, обладают низкой потребляемой мощностью, саморегулируемы по эффективности охлаждения в зависимости от температурно-влажностных составляющих охлаждаемого воздуха.

Главным элементом водоиспарительного охладителя является испарительная насадка, в каналах которой в процессе тепломассообмена происходит охлаждение воздуха. Она представляет собой пакет капиллярно-пористых пластин, образующих каналы воздуховодного тракта. Поверхность пластин смачивается водой либо верхним орошением, либо снизу.

Наиболее простые конструкции водоиспарительных кондиционеров базируются на принципе прямого охлаждения. Поток охлаждаемого воздуха направляется в каналы испарительной насадки. Снижение его температуры происходит в результате испарения воды со смоченной поверхности пластин при непосредственном контакте. Энталпия воздуха не изменяется, так как его охлаждение сопровождается насыщением парами испарившейся воды, и процесс обработки воздуха происходит по адиабатному закону. Моделирование работы таких охладителей проводилось в работах [1, 2].

Очевидный недостаток воздухоохладителя прямого принципа действия – переувлажнение воздуха и, как следствие, ограниченность зон их эксплуатации. Более сложные охладители основываются на принципе косвенного охлаждения. Каналы испарительной насадки при косвенном охлаждении делятся на две качественно разные группы. К первой группе относятся «мокрые» каналы, по которым проходит вспомогательный поток воздуха температуры, контактирующий с влажными поверхностями капиллярно-пористых пластин. Этот поток насыщается парами испарившейся воды и затем выбрасывается за границы охлаждаемого объема. Вторая группа – «сухие» каналы, по которым проходит основной поток воздуха температуры.

Охлаждение основного потока воздуха происходит за счет испарения влаги во вспомогательный поток воздуха и теплопередачи через тонкостенную поверхность пластин, образующих испарительную насадку. В отличие от прямого испарения, в этом случае начинают играть роль не только капиллярные свойства материала пластин, но и их поперечное термопротивление, зависящее от толщины пластины и теплопроводности материала.

Наиболее эффективной модификацией косвенного охлаждения являются установки регенеративного принципа действия. Схема их работы (см. рисунок) заключается в том, что часть охлажденного основного потока воздуха на выходе из воздухоохладителя разворачивается и направляется во вспомогательные каналы испарительной насадки. Двигаясь во встречном направлении, этот поток вбирает в себя пары жидкости, а вследствие теплопередачи через пластины отбирает тепло от основного потока воздуха. Отметим, что температура воздуха на входе во вспомогательный канал неизвестна и должна быть определена в процессе решения.

Одна из основных характеристик эффективности работы охладителей воздуха – холодопроизводительность, характеризующая возможностьнейтрализации теплопоступлений, равная

$$Q = Cp G_s (T_{\text{вх}} - T_{\text{вых}}),$$

где G_s – расход основного потока воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$;
 ρ , C – соответственно плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$, и удельная теплоемкость, $\text{Дж}/\text{кг}/\text{град}$;
 T – температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$.

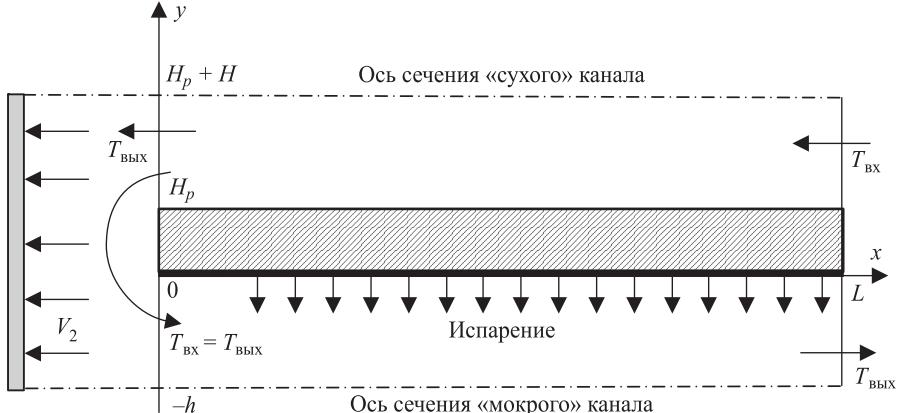


Рис. Фрагмент испарительной насадки

Моделирование процессов теплопереноса в пластинчатых теплообменниках проводилось в работах [3, 4].

Модель тепломассопереноса в каналах испарительной насадки регенеративных охладителей, в которой производится расчет всех параметров обрабатываемого воздуха как по длине, так и по сечению каналов, представлена в работе [5]. Она позволяет оценить характер воздействия многих параметров (как задаваемых, так и изменяемых) на интенсивность процессов тепломассообмена.

Эта модель состоит из следующих составляющих:

- уравнений энергии в каналах,
- уравнения переноса массы в «мокром» канале,
- уравнения распределения температуры в пластине,
- входных условий,
- условий четности на осах симметрии каналов,
- условий непроницаемости на торцах пластины,
- условий сопряжения.

Численное решение уравнений в каждом канале по отдельности невозможно, так как поверхность пластины, на которой необходимо ставить граничные условия, подвержена тепловому влиянию встречного потока, что исключает возможность пошагового движения в направлении потока воздуха в одном из каналов. В [5] предложен метод реализации этой модели, основанный на итерационном алгоритме решения системы конечно-разностных аналогов указанных выше составляющих математической модели.

Реализация математических моделей позволила провести численные эксперименты, отражающие воздействие различных факторов на эффективность работы охладителей. Одним из наиболее важных результатов расчетов было определение коэффициента отношения k расхода основного потока к вспомогательному для получения максимальной холодоизвлечательности, значение которого оказалось лежащим в промежутке 2,5–3.

Добиться достижения такого распределения потоков без введения дополнительных вентиляторов для вспомогательного потока воздуха можно с помощью установки на выходе основного потока воздуха решетки, которая кроме декоративной функции будет создавать заданное сопротивление потоку «сухого» воздуха для обеспечения необходимого вспомогательного потока.

Коэффициент сопротивления плоской решетки зависит от коэффициента живого сечения решетки $f = (\Sigma f_{\text{отв}})/F_p$ (F_p – общая площадь решетки, $\Sigma f_{\text{отв}}$ – сумма площадей отверстий), от формы краев отверстий, а также от числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{V_{\text{отв}} \cdot d_{\text{отв}}}{v},$$

где $V_{\text{отв}}$ – скорость в отверстиях, м;

$d_{\text{отв}}$ – диаметр отверстий, м;

v – кинематический коэффициент вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$.

Потеря давления при прохождении основным потоком решетки определяется по формуле

$$\Delta P_{\text{отв}} = \xi_{\text{отв}} \frac{\rho V_2^2}{2},$$

где V_2 – средняя скорость перед препятствием; коэффициент сопротивления [6]:

$$\xi_{\text{отв}} = \xi/f^2 + E \cdot \xi_1.$$

Значения для коэффициента E вычисляются по табл. 1 или по соответствующей аппроксимирующей формуле в диапазоне $100 \leq \text{Re} \leq 4 \cdot 10^3$

$$E = (0,0929 \cdot \ln \text{Re} - 0,221)^{0,5}.$$

Таблица 1. Значения коэффициента E

Re	100	200	400	600	1000	2000	4000
E	0,45	0,52	0,58	0,62	0,65	0,69	0,74

Коэффициент ξ_1 может быть вычислен следующим образом [6]:

$$\xi_1 = 1/f \cdot [0,707 \cdot (1-f)^{0,375} + 1-f]^2.$$

Там же приведены табличные значения ξ в зависимости от изменения значений Re и «живого» сечения решетки f (табл. 2).

Таблица 2. Значения коэффициента ξ

F_0/F_1	Re					
	10^2	$2 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^2$	10^3	$2 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$
0,1	0,89	0,69	0,64	0,39	0,30	0,22
0,2	0,85	0,67	0,57	0,36	0,26	0,20
0,3	0,75	0,57	0,43	0,30	0,22	0,17
0,4	0,57	0,40	0,28	0,19	0,14	0,10
0,5	0,34	0,19	0,12	0,07	0,05	0,03
0,6	0,19	0,10	0,06	0,03	0,02	0
0,7	0,11	0,06	0,03	0,02	0,01	0
0,8	0,06	0,03	0,02	0,01	0	0
0,9	0,03	0,01	0	0	0	0
0,95	0	0	0	0	0	0

Для программной реализации удобнее пользоваться непрерывным аналогом этой зависимости, выраженной в виде функции

$$\xi = 5,24 \cdot 10^{-9} \text{Re}^2 + 0,74 \cdot f^2 + 8,8 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Re} \cdot f - 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Re} - 1,65f + 0,89.$$

Рассмотрим теперь аэродинамические сопротивления вспомогательного потока воздуха. Одним из основных сопротивлений является «транспортное» сопротивление, которое с учетом ламинарности потока в плоских каналах вычисляется по формуле [7]:

$$\Delta P_{\text{tp}} = 217 \frac{L V_m}{h^2} 10^{-6},$$

где L – длина канала, м.

h – сечение канала, м.

Вспомогательный поток воздуха для вхождения в систему «мокрых» каналов разворачивается на 180° . Коэффициент сопротивления плоского симметричного двустороннего поворота потока на 180° без рассечек, обтекателей и направляющих лопаток [6] $\xi_{\text{разв}} = 4\text{--}4,2$, а соответствующая ему потеря давления, отнесенная к скорости V_m вспомогательного потока перед входом в «мокрые» каналы:

$$\Delta P_{\text{разв}} = \xi_{\text{разв}} \frac{\rho V_m^2}{2}.$$

Кроме того, в конструкциях водоиспарительных кондиционеров обычно используется отвод вспомогательного потока воздуха в направлении, перпендикулярном предшествующему движению. Потеря давления при повороте на 90° при $Re < 2 \cdot 10^3$ определяется по формуле

$$\Delta P_{\text{пов}} = \xi_{\text{пов}} \frac{\rho V_m^2}{2}.$$

Коэффициент местного сопротивления колен с острыми кромками на повороте вычисляется по формуле [6]

$$\xi_{\text{пов}} = A / Re + \xi_2,$$

где $A = 400$, $\xi_2 = 1,399$, а Re вычислено для скорости после поворота.

Параметры решетки определяются численным решением трансцендентного уравнения, полученного приравниванием аэродинамических сопротивлений основного и вспомогательного потоков.

Например, при насадке длиной 0,4 м, сечениями каналов 0,002 м и скоростью вспомогательного потока 2 м/с уравнение для определения f выглядит следующим образом:

$$2,26(0,002/f^2 + 0,741f^2 + 0,87 - 0,0687/f - 1,65f) + \\ + 2,26\sqrt{0,1 \ln(625/f) - 0,221}(0,707(1-f)^{0,375} + 1-f)^2 = 57,5f^2.$$

Решением этого уравнения для перераспределения потоков в отношении 3:1 в пользу основного потока является значение $f = 0,25$.

Заключение. При изготовлении рекуперативных косвенно-испарительных охладителей часто использовался дополнительный вентиляторный блок для осуществления отвода вспомогательного потока воздуха в необходимом количестве. Это существенно увеличивало габариты установок и их стоимость. Кроме того, в представленной работе и ей предшествующей [5] выявлены рациональные режимы работы указанных охладителей и определенные ими геометрические параметры установок. Результаты работы могут быть использованы при конструировании охладителей указанного принципа действия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шацкий В.П., Чесноков А.С. Варианты монтажа и характеристики работы водоиспарительных охладителей // Науч. вестн. ВГАСУ. Строительство и архитектура. 2010. № 3(19). С. 32–39.
2. Шацкий В.П., Гулевский В.А., Чесноков А.С. К вопросу о расчете геометрических размеров водоиспарительных охладителей воздуха // Изв. вузов. Строительство. 2010. № 5. С. 50–56.
3. Шацкий В.П., Гулевский В.А. О некоторых аспектах моделирования работы пластинчатых теплообменников // Изв. вузов. Строительство. 2011. № 12. С. 84–90.
4. Шацкий В.П., Гулевский В.А. Моделирование теплообмена в пластинчатых теплообменниках // Вестн. ВГАУ. 2012. № 2(33). С. 140–143.
5. Шацкий В.П., Гулевский В.А. Особенности реализации математической модели тепло- и массообмена в косвенно-рекуперативных водоиспарительных охладителях // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 4. С. 39–47.
6. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
7. Шацкий В.П., Гулевский В.А., Чесноков А.С. Совместное моделирование тепломассопереносных и аэродинамических процессов в водоиспарительных охладителях // Науч. вестн. ВГАСУ. Строительство и архитектура. 2010. № 3(19). С. 40–45.

Осипов Евгений Николаевич, асп.

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I
Шацкий Владимир Павлович, д-р техн. наук, проф.

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I
Спирина Наталья Геннадьевна, ассист.

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Получено 08.12.15

Osipov Evgeniy Nikolaevich, Post-graduate Student

Voronezh State Agricultural University named after Emperor Peter I, Russia

Shatskiy Vladimir Pavlovich, DSc, Professor

Voronezh State Agricultural University named after Emperor Peter I, Russia

Spirina Natal'ya Gennad'evna, Assistant

Voronezh State Agricultural University named after Emperor Peter I, Russia

TO THE QUESTION OF THE REDISTRIBUTION OF AIR FLOW IN EVAPORATIVE COOLERS RECUPERATIVE

Discusses the modeling of the choice of some geometrical parameters of indirectly-regenerative evaporative cooler air for the redistribution of air flows for provide its maximum cooling capacity. Substantiates the possibility of obtaining the optimal values of the redistribution of the main and auxiliary streams of air due to the aerodynamic resistance grid, that allows to exclude from the air cooling system of the additional fan unit for discharging an auxiliary stream of air.

К e y w o r d s: counter flow regenerative cooler, aerodynamic drag, simulation, system of equations, the cooling capacity.

REFERENCES

1. Shatskiy V.P., Cheskakov A.S. Varianty montazha i kharakteristiki raboty vodoisparitel'nykh okhladiteley [Mounting options and specifications of the work

- coolers of air, that use water evaporation]. Nauchnyy vestnik VGASU. Stroitel'stvo i arkhitектura [Scientific Herald of VSUACE. Construction and architecture]. 2010. No. 3(19). Pp. 32–39. (in Russia)
2. Shatskiy V.P., Gulevskiy V.A., Cheskikh A.S. K voprosu o raschete geometricheskikh razmerov vodoisparitel'nykh okhladiteley vozdukh [On the calculation of the geometric dimensions of coolers of air, that use water evaporation]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2010. No. 5. Pp. 50–56. (in Russia)
3. Shatskiy V.P., Gulevskiy V.A. O nekotorykh aspektakh modelirovaniya raboty plastinchatykh teploobmennikov [About some aspects of simulating plate heat exchangers]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2011. No. 12. Pp. 84–90. (in Russia)
4. Shatskiy V.P., Gulevskiy V.A. Modelirovanie teploobmena v plastinchatykh teploobmennikakh [Modeling of heat transfer in the plate heat exchanger]. Vestnik VГAU [Herald of VSAU]. 2012. No. 2(33). Pp. 140–143. (in Russia)
5. Shatskiy V.P., Gulevskiy V.A. Osobennosti realizatsii matematicheskoy modeli teplo- i massoobmena v kosvenno-rekuperativnykh vodoisparitel'nykh okhladitelyakh [Peculiarities of realization of mathematical model of heat and mass exchange in indirectly-regenerative of evaporative coolers air]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2012. No. 4. Pp. 39–47. (in Russia)
6. Idel'chik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim sопротивлениям [Handbook of hydraulic resistances]. Moscow, Machinery engineering, 1992. 672 p. (in Russia)
7. Shatskiy V.P., Gulevskiy V.A., Cheskikh A.S. Sovmestnoe modelirovaniye teplomassoperenosnykh i aerodinamicheskikh protsessov v vodoisparitel'nykh okhladitelyakh [Joint modeling model of heat and mass exchange and aerodynamic processes in coolers of air, that use evaporation water]. Nauchnyy vestnik VGASU. Stroitel'stvo i arkhitектura [Scientific Herald of VSUACE. Construction and architecture]. 2010. No. 3(19). Pp. 40–45. (in Russia)

УДК 628.336.515

Н.В. КУЗНЕЦОВА, В.И. ЩЕРБАКОВ, Т.В. ЩУКИНА

ПРОЕКТИРОВАНИЕ БИОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Предложенная методика расчета учитывает влияние на выход биогаза категории и качества сырья, направляемого на утилизацию. Достигаемая высокая достоверность в прогнозировании его воспроизведения обеспечивает подбор требуемого для организации бесперебойной конверсии оборудования, снижая дополнительный перерасход средств. Представленные графические зависимости для животноводческих комплексов позволяют выполнить предварительную оценку необходимых объемов метантенков и газгольдеров.

Ключевые слова: сточные воды, анаэробное сбраживание, биогаз.

Стратегическое развитие агропромышленного комплекса РФ предполагает восстановление посевных площадей и рост поголовья в животноводстве, что неизбежно сопровождается увеличением воспроизводства органических отходов. Среди способов их утилизации наиболее целесообразным является анаэробное сбраживание, в результате которого за короткий срок получают биогаз и готовое к внесению в почву удобрение. Но применение такой эффективной технологии переработки сдерживается возникающими проблемами как на уровне проектирования, так и последующего согласования альтернативных систем газоснабжения. Отсутствие достаточной точности в прогнозировании выхода сырья и информационная ограниченность в параметрах применяемых для этой цели технических средств негативно отражаются на проектных решениях и в дальнейшем приводят к неустойчивым режимам конверсии, характеризующимся понижением скорости и качества переработки отходов.

Для расчета биогазовых станций под объемы сточных вод от городских канализационных сетей, крупных животноводческих комплексов или фермерских хозяйств прежде всего необходимо оценить среднесуточное поступление фекалий.

Для определения ежедневно образующегося осадка от сточных вод следует воспользоваться статистическими данными городских очистных сооружений и перейти в расчетах к относительной единице, например, приходящейся на 10 тыс. населения. Это позволит при строительстве новых микрорайонов с большей достоверностью прогнозировать суточное поступление органической массы в метантенки. Для биогазовых станций животноводческих комплексов целесообразно воспользоваться нормами проектирования [1, 2], в соответствии с которыми количество субстрата, получаемого от одного животного, кг/сут, можно с достаточной точностью определить по формуле [3]

$$G_1 = \alpha_W (g_k + g_m) + g_n, \quad (1)$$

где g_k , g_m – суточное выделение кала и мочи одним животным следует принимать в соответствии с технологическими нормами проектирования, приведенными в табл. 1 [1, 2], кг/сут;

g_n – норма подстилки на одно животное [1, 2], кг/сут;

α_w – коэффициент подмешивания воды при различных способах уборки навоза: при лотково-смывойной системе с мойкой полов $\alpha_w = 5-6$; то же при сухой чистке полов $\alpha_w = 3-3,5$; при удалении самотеком $\alpha_w = 1,5$; при транспортерной системе уборки $\alpha_w = 1,2$ [3].

Таблица 1. Данные по выходу навоза от одного животного

Группа животных	Выход в сутки от одного животного, кг		
	моча	кал	всего экскрементов
<i>Крупный рогатый скот</i>			
Быки-производители	10	30	40
Коровы	20	35	55
Телята:			
до 3 мес	3,5	1	4,5
от 3 до 6 мес	2,5	5	7,5
Молодняк:			
от 6 до 12 мес	4	10	14
от 12 до 18 мес	12	15	27
Нетели	12	23	35
<i>Свиньи</i>			
Хряки-производители	6	9	15
Свиноматки:			
супоросные и холостые	8	9	17
подсосные с приплодом	10	12	22
Поросыта-отъемыши	0,8	2,5	3,3
Ремонтный молодняк	2,5	5	7,5
Свиньи на откорме	2,5	5	7,5

При расчете фекалий, поступающих в систему утилизации, необходимо учитывать все имеющиеся в хозяйстве группы животных, а также предварительное уплотнение осадка в соответствии с выражением

$$G_{\text{сyt}}^{\text{BM}} = \beta \sum_{i=1}^n G_i m_i, \quad (2)$$

где m_i – поголовье группы однотипных животных;

n – количество производственных групп на животноводческом предприятии;

β – коэффициент уплотнения сырья, принимаемый $\beta = 1$ при $\alpha_w \leq 1,5$, $\beta = 0,3$ при $\alpha_w = 3-3,5$ и $\beta = 0,2$ при $\alpha_w = 5-6$.

Для небольшого фермерского хозяйства, где по соображениям экономии капитальных затрат следует устанавливать только один реактор, необходимо предусматривать накопитель экскрементов объемом

$$V_h = \frac{G_{\text{субт}}^{\text{BM}} \tau_h}{\varphi_h \rho_0}, \quad (3)$$

где τ_h – продолжительность сбора субстрата, сут;
 ρ_0 – плотность направляемого на брожение осадка, кг/м³;
 φ_h – коэффициент заполнения накопителя, $\varphi_h = 0,8–0,9$.

Тогда объем метантенка можно определить из соотношения

$$V_m = \frac{G_{\text{субт}}^{\text{BM}} \tau}{\varphi \rho_0}, \quad (4)$$

где τ – продолжительность сбраживания субстрата, сут;
 φ – коэффициент заполнения метантенка, $\varphi = 0,7–0,8$.

Для бесперебойной выработки биогаза при одной загрузке реактора в начале цикла брожения сбор навоза и его конверсию по продолжительности следует принимать равными, т.е. $\tau_h = \tau$. Время переработки метанообразующими бактериями зависит от температурного режима и может составлять от 10 до 50 сут. Термофильные условия, при которых оптимальная температура конверсии составляет 53–55 °С, сокращают сроки переработки субстрата и тем самым способствуют снижению объемов проектируемых метантенков. При психрофильном и мезофильном режимах температуру для адаптации микроорганизмов следует поддерживать в пределах 15–17 и 33–35 °С соответственно [4]. Снижение теплового режима замедляет их жизнедеятельность, что приводит к продолжительной переработке органических отходов.

Для определения требуемого времени для сбраживания можно воспользоваться аппроксимацией вида

$$\tau = 79,89 - 0,6632t - 0,0296t^2 + 0,004t^3, \quad (5)$$

где t – температура сбраживания, °С.

При численности поголовья, позволяющей установить два и более метантенка, необходимость в накопителях отпадает, так как на начальном этапе реакторы можно использовать как емкости для сбора сырья с плавным запуском процесса брожения. Затем при полной загрузке и в отсутствие доступа кислорода наступает фаза активного метанообразования.

При создании такой схемы переработки общий объем реакторов можно найти по формуле (4), предполагая, что τ включает и период накопления. Выполняя последующий выбор конкретной конструкции реактора и соответственно его объема, несложно рассчитать и их требуемое количество.

При получении биогаза из сточных вод, в том числе и от комплексов животноводства, скорость его образования в единице объема сбраживаемого субстрата, (м³)_{GAS}/(м³ · сут), следует определять по зависимости [4, 5]

$$U_{BG} = \frac{B_0 S_0}{\tau} \left(1 - \frac{K}{\mu_m \tau - 1 + K} \right), \quad (6)$$

где B_0 – предельный выход биогаза из единицы органического вещества, загруженного в метантенк, при полном его разложении (табл. 2), (м³)_{GAS}/кг;

Таблица 2. Получаемый объем биогаза с 1 т исходного сырья

Наименование сырья	Объем получаемого биогаза		Содержание метана, %, в биогазе до
	м ³ /т	с 1 кг сухого органического вещества, м ³ /кг	
Навоз крупного рогатого скота	50–60	0,47	60
Свиной навоз	55–65	0,52	60
Помет несушек, цыплят и бройлеров при клеточном содержании	130–140	1,21	60
Помет несушек, цыплят и бройлеров с подстилкой	80		60
Продукты бойни в животноводстве	300	0,7	65
Животный жир	1300		87
Силосная кукуруза	220		
Ботва свеклы	200		54
Различные виды трав	250		
Различные виды энергетических растений	150–500		70

S_0 – концентрация органического вещества в загружаемом осадке, кг/м³;
 τ – продолжительность сбраживания, принимаемая в соответствии с поддерживаемым температурным режимом от 10 до 30 дней, сут;

K – безразмерный кинетический параметр процесса, зависящий от концентрации органического вещества;

μ_m – максимальная удельная скорость роста активной биомассы, сут⁻¹, на которую основное влияние оказывает температурный режим в соответствии с эмпирическим выражением [4]:

$$\mu_m = 0,013t - 0,129. \quad (7)$$

Для инженерных расчетов и подбора требуемого оборудования целесообразно использовать среднюю величину кинетического параметра K [5], определяемую по формуле

$$K = 0,368 \frac{\mu_m S_0 \tau}{\rho_0}. \quad (8)$$

Концентрация органического вещества в исходном субстрате зависит от влажности W , зольности на сухую массу A в процентном выражении и объемной плотности осадка ρ_0 [4, 6]. При известном содержании органических составляющих в сухом веществе концентрацию следует определять по выражению

$$S_0 = \rho_0 C_{\text{вм}} (100-W) \cdot 10^{-4}, \quad (9)$$

где $C_{\text{вм}}$ – содержание органических веществ в сухом субстрате, %, определяемое по данным табл. 3. Влажность сырья, направляемого на конверсию, как правило, составляет 85–95 % [1, 6].

Суточный расход получаемого при брожении газа, (м³)_{GAS}/сут, с учетом скорости выхода рассчитывается по формуле

$$L_{BG} = U_{BG} \frac{G_{\text{сут}}^{\text{вм}}}{\rho_0}. \quad (10)$$

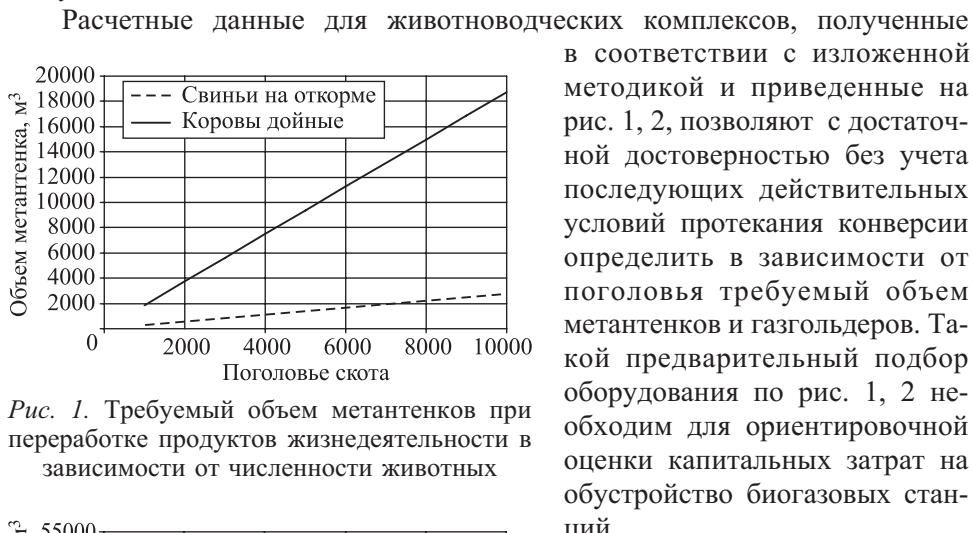
Таблица 3. Состав экскрементов животных к сухому веществу, %

Компонент	КРС на откорме	Дойные коровы	Свиньи	Куры
Органическая масса:	77–85	77–85	77–84	76–77
сырая клетчатка	27,6–50,3	27,6–50,3	19,5–21,4	13–17,8
сырой протеин	9,3–20,7	9,3–20,7	16,4–21,5	20,5–42,3
сырой жир	2,9–4,3	2,9–4,3	3,5–4	2,4–5
лигнин	13–30	16–30	—	9,6–14,3
Азот	2,3–4	1,9–6,5	4–10,3	2,3–5,7
Фосфор	0,4–1,1	0,2–0,7	1,9–2,5	1–2,7
Калий	0,6–1,4	2,3–4,9	—	5,6–11,6
Магний	0,5–0,6	—	—	0,9–1,1
Соотношение C/N	9–15	9–15	9–15	9–15

Требуемые объемы газгольдеров целесообразно определять с учетом режима накопления получаемого топлива при отсутствии возможности своевременной его поставки потребителям или перевода в сжиженное состояние

$$V_{BG} = L_{BG} \tau_h^{BG}, \quad (11)$$

где τ_h^{BG} – период сбора получаемого топлива, принимаемый в пределах 30 сут.



Расчетные данные для животноводческих комплексов, полученные в соответствии с изложенной методикой и приведенные на рис. 1, 2, позволяют с достаточной достоверностью без учета последующих действительных условий протекания конверсии определить в зависимости от поголовья требуемый объем метантенков и газгольдеров. Такой предварительный подбор оборудования по рис. 1, 2 необходим для ориентировочной оценки капитальных затрат на обустройство биогазовых станций.

Чтобы снизить первоначальные вложения и сделать более доступным этот вид переработки органических отходов, необходимо создавать условия, увеличивающие скорость конверсии и суточный выход биогаза. В свою очередь это сократит объемы реакторов, существенно уменьшая капитальные

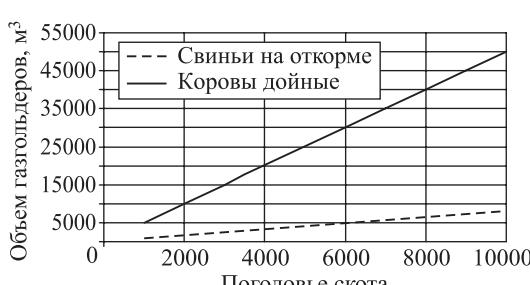


Рис. 2. Необходимый объем газгольдеров при перебоях в отпуске биогаза для хранения в течение 30 сут

расходы на их сооружение. Повысить в сырье, направляемом на переработку, концентрацию органики, являющейся питательной средой для метанообразующих микроорганизмов, можно за счет применения многокамерных метантенков с фильтрующими перегородками и с периодическим удалением из них осветленной жидкости. Так как последняя насыщена перерабатывающими бактериями, ее следует направлять для предварительного смешивания с поступающими на обработку фекалиями [7].

Приведенная последовательность расчета для основного оборудования биогазовых станций учитывает осредненную величину безразмерного параметра кинетики брожения и прогнозируемую продолжительность процесса при выбранном тепловом режиме его протекания. Параметр кинетики характеризует вносимое сырье с точки зрения питательной среды для роста колоний метанообразующих бактерий. Температура брожения, определяющая в том числе и временной интервал цикла, обосновывается возможностью использования тепловой энергии при предварительном обустройстве метантенков поверхностью нагрева или применением лишь только эффективной тепловой изоляции для защищаемой оболочки. Расширение учитываемых в методике факторов влияет на точность определения выхода биогаза, что после проектирования установок при их дальнейшей эксплуатации позволяет избежать повышения давления в газгольдерах и срабатывания предохранительных клапанов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. НТП АПК 1.10.01.001–00. Нормы технологического проектирования ферм крупного рогатого скота крестьянских хозяйств. М.: ГУ ЦНТИ «Меливодинформ», 2000. 120 с.
2. НТП АПК 1.10.02.001–00. Нормы технологического проектирования свиноводческих ферм крестьянских хозяйств. М.: ГУ ЦНТИ «Меливодинформ», 2000. 103 с.
3. Земсков В.И. Возобновляемые источники энергии в АПК. СПб.: Изд-во «Лань», 2014. 368 с.
4. Гюнтер Л.И., Гольдфарб Л.Л. Метантенки. М.: Стройиздат, 1991. 128 с.
5. Щербаков В.И., Кузнецова Н.В., Щукина Т.В. Интенсификация утилизации органических осадков сточных вод для производства биогаза // Естественные и технические науки. 2014. № 11–12. С. 387–390.
6. Ласков Ю.М., Воронов Ю.В., Каличун В.И. Примеры расчетов канализационных сооружений. М.: ИД «Альянс», 2008. 255 с.
7. Щербаков В.И., Гогина Е.С., Щукина Т.В., Кузнецова Н.В. Утилизация органических отходов на основе производства биогаза // Изв. МГТУ «МАМИ». Сер. 4. Химическое машиностроение и инженерная экология. Т. 2, ноябрь 2013. С. 192–196.

Кузнецова Надежда Владимировна, асп.; E-mail: polecat_3@mail.ru

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

Щербаков Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: scher@vgasu.vrn.ru

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

Щукина Татьяна Васильевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: schukina.niki@yandex.ru

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

Kuznetsova Nadezhda Vladimirovna, Post-graduate Student; E-mail: polecat_3@mail.ru
Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Shcherbakov Vladimir Ivanovich, DSc, Professor; E-mail: scher@vgasu.vrn.ru
Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Shchukina Tat'yana Vasil'evna, PhD, Ass. Professor; E-mail: schukina.niki@yandex.ru
Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

DESIGN OF BIOGAS PLANTS FOR RECYCLING OF ORGANIC WASTE

The calculation methodology takes into account the effect on biogas yield category and quality of raw materials sent for recycling. The reached high reliability of forecasting of reproduction of its volumes provides selection of the equipment demanded for the organization of uninterrupted conversion, cutting an additional consumption of means.

К e y w o r d s: sewage, anaerobic digestion, biogas.

REFERENCES

1. NTD AIC 1.10.01.001–00. Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya ferm krupnogo rogatogo skota krest'yanskikh khozyaystv [Norms of technological design of farms of cattle of country farms]. Moscow, GU TSNTI «Melivodinform», 2000. 120 p. (in Russia)
2. NTD AIC 1.10.02.001–00. Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya svinovodcheskikh ferm krest'yanskikh khozyaystv [Norms of technological design of pig-breeding farms of country farms]. Moscow, GU TSNTI «Melivodinform», 2000. 103 p. (in Russia)
3. Zemskov V.I. Vozobnovlyayemye istochniki energii v APK [Renewables in agrarian and industrial complex]. Saint-Petersburg, Lan publishing house, 2014. 368 p. (in Russia)
4. Gyunter L.I., Gol'dfarb L.L. Metantenki [Metantenki]. Moscow, Stroyizdat, 1991. 128 p. (in Russia)
5. Shcherbakov V.I., Kuznetsova N.V., Shchukina T.V. Intensifikatsiya utilizatsii organicheskikh osadkov stochnykh vod dlya proizvodstva biogaza [Intensification of utilization of organic rainfall of sewage for production of biogas]. Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Natural and technical sciences]. 2014. No. 11–12. Pp. 387–390. (in Russia)
6. Laskov Yu.M., Voronov Yu.V., Kalitsun V.I. Primery raschetov kanalizatsionnykh sooruzheniy [Examples of calculations of sewer constructions of]. Moscow, IDES «Alliance», 2008. 255 p. (in Russia)
7. Shcherbakov V.I., Gogina E.S., Shchukina T.V., Kuznetsova N.V. Utilizatsiya organicheskikh otkhodov na osnove proizvodstva biogaza [Utilization of organic waste on the basis of production of biogas]. Izvestiya MGTU «MAMI». Seriya 4. Khimicheskoe mashinostroenie i inzhenernaya ekologiya [News of MGTU of «MAMI». Series 4. Chemical mechanical engineering and engineering ecology]. Vol. 2, November, 2013. Pp. 192–196. (in Russia)

УДК 628.142 : 62-192

Е.М. ГАЛЬПЕРИН

НАДЕЖНОСТЬ И НОРМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОЛЬЦЕВОЙ ВОДОПРОВОДНОЙ СЕТИ

Рассматривается задача обеспечения надежности кольцевой водопроводной сети с помощью норм ее проектирования. Отмечается неудовлетворительное качество раздела «Водоводы, водопроводные сети и сооружения» актуализированной редакции СНиП 2.04.02–84* СП 31.13330.2012. Раздел этот написан без учета последних достижений в области надежности, по сути, копирует тексты предыдущих СНиПов, которые были написаны в период, когда теории надежности не было или она только создавалась. Такие понятия, как кольцевание водопроводной сети, ограничение времени ремонта, в ранее выпущенных СНиПах были внесены, руководствуясь здравым смыслом и интуицией. Ныне, когда теория надежности достаточно развита, эти понятия заняли свое место в ее общем контексте, никоим образом не характеризуют надежность объекта в целом. Кольцевание водопроводной сети является одним из видов ее резервирования (но не единственным!), а время ремонта служит одним из показателей ремонтопригодности.

В нынешней редакции нормативного документа отсутствует понятие надежности водопроводной сети, которая характеризуется временем выполнения объектом своих функций. С удивительной настойчивостью игнорируется приказ бывшего Минрегиона РФ № 48, выпущенного в 2008 г., в котором такое понятие было сформулировано. Наличие существующих норм проектирования водопроводной сети наносит только вред, который необходимо безотлагательно исправлять.

Ключевые слова: надежность, водопроводная сеть, нормы проектирования, исправное состояние, приказ № 48 от 2008 г. Минрегиона РФ, неисправное состояние.

Надежность кольцевой водопроводной сети имеет исключительно большое значение для водоснабжения, ибо она является самым ненадежным звеном на пути к потребителю. Этот факт признавался с момента возникновения первых водопроводных сетей. В выпущенных в разное время нормативных документах по проектированию объектов по водоснабжению ни одному сооружению этой системы не уделено столько внимания как надежности водопроводной сети. Со временем значение надежности подачи воды через водопроводную сеть еще более возросло. Значительно увеличилась доля жилого фонда с высоким уровнем благоустройства. В этих условиях перерыв в подаче воды делает невозможным пользование как водопроводом холодной воды, так и внутренней канализацией, что создает тяжелые санитарно-гигиенические условия жизни населения. В том случае, если приготовление горячей воды осуществляется с помощью местных водонагревателей, перерыв в подаче холодной воды лишает потребителя и горячего водоснабжения.

В первоначально созданных нормах на проектирование наружных сетей и сооружений водоснабжения надежность подачи воды стремились обес-

печатить на интуитивном уровне, руководствуясь здравым смыслом. Таким образом, в нормативных документах появились требования проектирования, как правило, кольцевой водопроводной сети, ибо надежнее, когда к потребителю вода поступает как минимум по двум путям, чем по одному. Сокращение времени ремонта, очевидно, уменьшает время нахождения водопроводной сети в неисправном состоянии и, следовательно, повышает ее надежность.

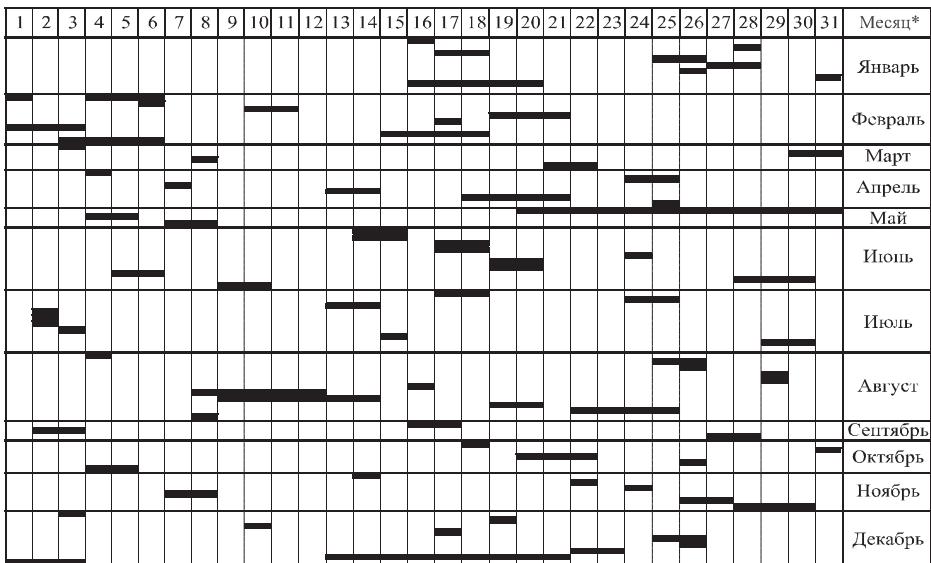
После Второй мировой войны бурное развитие получили радиоэлектроника, новые виды сложной техники вооружения. В ряде случаев сложные объекты вели себя контринтуитивно. Во второй половине XX в. создалась ситуация, способствующая появлению теории надежности. Специалисты, работающие в области водоснабжения, предприняли усилия по использованию аппарата теории надежности в сфере водоснабжения. Применяя накопленный статистический материал (особенно в московском водопроводе), были проведены исследования, позволившие сделать вывод: «анализ статистических данных показал, что повреждения трубопроводов водопроводных сетей подчиняются пуассоновскому закону распределения случайных событий» [1].

В работах [1, 2], используя аппарат системы массового обслуживания (СМО), показано, что значительное время, а иногда постоянно кольцевая водопроводная сеть находится в неисправном состоянии. В [2] были приведены фактические данные, подтверждающие эти выводы, что подрывало основы расчета водопроводной сети, согласно которым, в соответствии со СНиПом¹ нормально обеспечивать потребителя водой следует только исправной водопроводной сетью.

Отвечая на критику действующего СНиПа в том, что он не отражает реальность и условия жизни [3], автор соответствующего раздела СНиПа [4] бездоказательно утверждал, что все беды с водопроводной сетью происходят из-за отступлений от требований СНиПа. То обстоятельство, что действующие водопроводы обладают практически достаточной надежностью, автор [4] объяснял тем, что ни один из них не построен в соответствии со СНиПом, во всех функционирующих водопроводных сетях трубы проложены со значительной избыточностью пропускной способности по сравнению с рекомендуемыми методическими указаниями. Эта избыточность пропускной способности является тем резервом, который гарантирует нормальное обеспечение потребителей водой в неисправных состояниях.

На рисунке представлен график отключения водопроводной сети диаметром 400 мм и выше, общей длиной 325,78 км в г. Самаре за 2014 г. График построен по данным, представленным ООО «Самарские коммунальные системы», эксплуатирующими водопроводные сети города. В графике каждой неисправности отведена одна строка (чтобы не загружать график, линии между строками не проведены). Дни, в которых была отключена труба, на графике выделены черным цветом. В том случае, если время отключения составляло менее суток, при построении графика оно принималось равным одним суткам. За 2014 г. в этой части сети было произведено 82

¹ СП 31.13330.2012. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02–84*. М.: Минрегионразвития России, 2012. П. 8.6.



* Время ремонта указано с точностью до суток.

отключения, параметр потока отказа составил $\frac{82}{325,78} \approx 0,25 \frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}}$, в графике на рисунке соответственно 82 строчки.

Анализ графика позволяет сделать некоторые выводы:

- в неисправном состоянии рассматриваемая сеть находилась 139 дней, т.е. 38 % годового периода;
- в некоторые месяцы водопроводная сеть находилась в исправном состоянии половину месяца и даже менее. Например, в июне она исправно работала 16 дней, в мае – 15, а в феврале, декабре и августе всего 14 дней;
- в 26 случаях в рассматриваемой водопроводной сети г. Самары происходило одновременно 2 отключения, а дважды за 2014 г. одновременных отключений было 3;
- время ремонта одной неисправности в среднем составляло 2 дня.

В том, что водопроводная сеть при существующих в России значениях параметра потока отказов трубопроводов $\lambda = 0,5 \div 2,0$ [5, с. 146] и времени восстановления в среднем 1–2 сут не может функционировать в исправном состоянии, можно убедиться несложным расчетом. Для примера рассмотрим водопроводную сеть протяженностью 200 км, на ней в течение года при $\lambda = 1 \frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}}$ произойдет 200 аварий, если время ремонта 1 сут,

в исправном состоянии она будет $\frac{365 - 200}{365} = 0,45$ годового периода. Легко

убедиться, что при времени работы 2 сут такая сеть в течение года в исправном состоянии не будет ни одного дня.

Удивительно, что и элементарные расчеты надежности, и данные о фактических условиях работы кольцевой водопроводной сети игнорируются авторами раздела СНиПа, посвященного ее проектированию. Формулировки раздела о расчете водоводов и водопроводной сети СНиПа, выпущенного в 2012 г., практически повторяют слово в слово текст, написанный

в последней четверти прошлого века. Так, в СНиП II-31-74 п. 8.33 содержалась запись, что «выбор диаметров труб водоводов и водопроводных сетей следует производить на основании технико-экономических расчетов, учитывая при этом их работу при аварийном выключении отдельных участков». То же содержится в СНиПе¹ (п. 11.44). Не учтено, что в последнее время расчет водопроводной сети выполняется на компьютерах. Это лишает его трудоемкости, статистические данные свидетельствуют о пребывании кольцевой водопроводной сети в неисправных состояниях значительное количество времени, а иногда и постоянно.

Непонятно, что такое «аварийное выключение». В приложении А к СНиПу¹, которое определяется как «Термины и определения», понятия «авария» нет. Это период, когда произошла разгерметизация трубопровода и происходит излив воды на поверхность земли, либо это время, когда неисправный участок отключен? В первом случае это будет аварийное состояние, во втором имеет место неисправное состояние водопроводной сети. Реакции на эти состояния будут разные. Если в первом случае требуются быстрые, оперативные действия по отключению неисправного участка, то во втором случае ремонт может продолжаться несколько суток (см. график на рисунке).

А как понимать проведение «технико-экономических расчетов, учитывая при этом их работу при аварийном выключении отдельных участков»? Длина ремонтного участка, на котором не должно быть более 5 гидрантов¹ (п. 11.10), ориентировочно $0,8 \div 1,0$ км, таких участков на сети не одна сотня. Авторы СНиПа предлагают выполнить при проектировании сети несколько сот гидравлических расчетов? А если имеют место два и более одновременных отключения? Между прочим, такое событие вообще СНиПом не рассматривается. В СНиПе¹ (п. 11.6) только разбирается ситуация «при выключении одного участка». Как очевидно из графика на рисунке, ситуация с выключением одновременно более одного участка не редкость.

Определение надежности объектов водоснабжения, в частности кольцевой водопроводной сети, является камнем преткновения уже десятки лет. Как правило, о надежности водопроводной сети обычно предпочитают не распространяться, в основном речь ведут о надежности трубопроводов [6]. Известно, что надежность объекта – сложное комплексное свойство, состоящее из более простых свойств: безотказности, ремонтопригодности, долговечности и сохраняемости.

Широко принято, что надежность трубопровода определяют одним из показателей безотказности. В работе [7, с. 18] утверждается, что «для оценки надежности эксплуатируемых трубопроводов широко применяется такой показатель, как интенсивность отказов участка трубопровода $\lambda(t)\dots$ ». Действительно, можно привести большое количество публикаций, подтверждающих это положение. Глубокую ошибочность этого утверждения продемонстрируем следующим образом. Надежность – это время выполнения объектом своих функций. Функция трубопровода – транспортировать воду. Если на нем произошла авария, он не будет выполнять свою функцию на время ликвидации неисправности. Если время ремонта длится 2 сут, то остальные 363 дня в течение года он будет выполнять свою функцию, это и есть его надежность. Часто аппарат систем массового обслуживания используется в надежностных расчетах. Среднее время нахождения объек-

та в исправном состоянии (или финальная вероятность) [8, с. 129] определяется по выражению [9, с. 52]:

$$P_0 \text{ или } T_0 = \left[\sum_{k=0}^n \frac{n!}{(n-k)!} \cdot \rho^k \right]^{-1}, \quad (1)$$

где P_0 или T_0 – вероятность или среднее время нахождения объекта в исправном состоянии;

k – количество одновременно отключенных участков;

n – количество участков;

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}}{\mu};$$

$\bar{\lambda} = \lambda \cdot \ell$, где $\bar{\lambda}$ – параметр потока отказа участка длиной в ℓ км;

λ – параметр потока отказов с одного километра трубопровода в год,

$$\frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}};$$

$\mu = \frac{1}{t_{\text{рем}}}$ – параметр потока восстановления, $\frac{1}{\text{год}}$;

$t_{\text{рем}}$ – время ремонта как часть годового периода.

Длину ремонтного участка водопровода по СНиПу¹ (п. 11.10) следует принимать при прокладке водоводов в две и более линии и при отсутствии переключений не более 5 км. Определим надежность участка водовода, пользуясь формулой (1).

Исходные данные: $n = 1$, $\lambda = 1 \frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}}$, $\bar{\lambda} = \lambda \cdot \ell = 5$,

время ремонта – 1 сут, т.е. $\mu = 1 / \frac{1}{365} = 365$.

Решение. При $k = 0$ первое слагаемое равно 1, при $k = 1$ второе слагаемое $\rho = \frac{5}{365} = 0,0136986$. Тогда сумма равна 1,0136986, или $T_0 =$

$= \frac{1}{1,0136986} = 0,9865$ годового периода. Другими словами, участок будет

выполнять полностью свои функции, или его надежность $365 \cdot 0,9865 = 360$ дней в году.

Физически полученный результат очевиден. Каждый километр участка может отказать, т.е. отказов за год может быть 5, время восстановления – 1 сут, следовательно, в отключенном состоянии участок может находиться в течение года 5 сут, что подтвердил расчет. Очевидно, применение параметра λ в качестве показателя надежности трубопроводов является примером неграмотного использования аппарата теории надежности. Определять надежность трубопровода только по показателю безотказности, не учитывая показатель ремонтопригодности, в корне неправильно.

Вызывает вопрос в СНиПе рекомендация по установлению «расчетного времени ликвидации аварии»¹ (п. 11.4). Вновь непонятно, о какой аварии идет речь: то ли отключение неисправного участка, то ли его ремонт. По-видимому, речь идет о ремонте, так как время с 8 до 24 ч указано в зависимо-

сти от диаметра трубы и глубины заложения. Откуда эти странные цифры взяты, какие и где были проведены статистические исследования для включения в СНиП этих данных? Вообще-то время ремонта трубопровода влияет на надежность водоснабжения наряду с другими параметрами, такими как частота отказа (параметр потока отказов) и др. Но согласно ГОСТ, надежность определяется как «свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования»² (п. 1.1).

Удивительно, в СНиПе¹ отсутствует показатель надежности водопроводной сети, а показатель ремонтопригодности почему-то включен. Ясно, что достаточно высокую надежность можно обеспечить и при времени ремонта значительно большем, чем одни сутки. Для того чтобы убедиться в этом, достаточно посмотреть на рисунок. Очевидно, что в СНиПе¹ должен содержаться показатель надежности водопроводной сети. В 2008 г. бывшим Министерством регионального развития РФ был издан приказ [10], подписанный тогдашним Министром Д.Н. Козаком. В Приложении 1 к «Методике проведения мониторинга выполнения производственных и инвестиционных программ организаций коммунального комплекса», приложенной к приказу, в разделе производственных (п. 1.2.3) и инвестиционных (п. 2.1.3) программ указан такой показатель, как «количество часов представления услуг за отчетный период», в графе «механизм расчета индикатора» записано: «отношение количества часов представления услуг к количеству дней за отчетный период». К погрешности авторов формулировки следует отнести, что в отношении числитель и знаменатель указаны в разных единицах времени. Если эту погрешность исправить, то этот показатель будет указывать часть отчетного периода (месяца, квартала, года), во время которого потребитель нормально обеспечивался водой, т.е. надежность водоснабжения. Приказ прошел утверждение в Минюсте РФ, однако в жизнь не претворяется.

Следует отметить, что в области расчета надежности водопроводной сети сложилась ситуация, которую нельзя признать нормальной. Вопросы надежности водоснабжения слабо отражены в учебных программах по специальности «Водоснабжение и водоотведение». О серьезных недостатках, которыми страдает этот раздел в учебнике для студентов по специальности «Водоснабжение и водоотведение», отмечалось в работе [11]. Все это способствовало весьма некачественному написанию раздела «Водоводы, водопроводные сети и сооружения» в СНиПе¹. При написании так называемой актуализированной редакции¹ был устранен институт «Союзводоканалпроект», который вносил редакцию предыдущего СНиПа в 1984 г., и целый ряд ведущих институтов страны, а взамен приглашены только отдельные представители некоторых из них. Написание новой редакции СНиПа было поручено малоизвестной, несколько лет существующей организации «Росэкострой».

До тех пор пока в СНиПе не появится полноценный показатель надежности водоснабжения, такое положение будет продолжаться. Приложения

² ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

из приказа № 48 2008 г. бывшего Минрегиона РФ должны быть внедрены в жизнь и выполняться в обязательном порядке и в полном объеме.

Выводы. 1. В существующих нормах на проектирование водоводов и водопроводных сетей существуют установки, разработанные в прошлом веке, когда не существовала теория надежности, а все надежностные расчеты выполнялись на уровне интуиции и здравого смысла.

2. В последней редакции СНиП¹ полностью игнорируются достижения последних десятилетий в области развития теории надежности и расчета водопроводной сети, в том числе приказ Министерства регионального развития РФ 2008 г.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макогонов В.С. Исследование надежности водопроводных сетей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МИСИ, 1972.
2. Гальперин Е.М. Определение надежности функционирования кольцевой водопроводной сети // Водоснабжение и санитарная техника. 1989. № 6. С. 11–13.
3. Гальперин Е.М. Методика расчета кольцевых СПРВ и соответствующие разделы СНиП 2.04.02–84 не отражают реальность и требования жизни // Водоснабжение и санитарная техника. 1996. № 8. С. 6–7.
4. Мoshnin Л.Д. Ускорить корректировку нормативов по проектированию и эксплуатации систем водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника. 1996. № 8. С. 3–5.
5. Сомов М.А., Жураба М.Г. Водоснабжение. Т. 1. Система подачи и распределения воды: учебник для вузов. М.: Изд-во АСВ, 2010.
6. Храменков С.В., Примин О.Г. Оценка надежности трубопроводов системы водоснабжения Москвы // Водоснабжение и санитарная техника. 1999. № 7.
7. Примин О.Г. Анализ факторов, влияющих на надежность и экологическую безопасность водопроводной сети // Водоснабжение и санитарная техника. 2014. № 7.
8. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1986. 203 с.
9. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1987. 336 с.
10. Приказ Министерства регионального развития от 14 апреля 2008 г. № 48 «Об утверждении Методики проведения мониторинга выполнения производственных и инвестиционных программ организаций» [Электронный ресурс].
11. Гальперин Е.М. Еще раз о надежности функционирования водопроводной сети // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 5. С. 49–55.

Гальперин Евгений Моисеевич, канд. техн. наук, проф.; E-mail: evg-galperin@yandex.ru
Самарский государственный архитектурно-строительный университет

Получено после доработки 22.12.15

Gal'perin Evgeniy Moiseevich, PhD, Professor; E-mail: evg-galperin@yandex.ru
Samara State Architectural and Civil Engineering University, Russia

RELIABILITY AND DESIGN STANDARDS RING WATER NETWORK

The paper deals with the task of ensuring the reliability of the annular water supply network via its design standards. It noted the poor quality of chapter «Water lines, water supply

systems and facilities» the updated version of SNiP 2.04.02-84 * SP 31.13330.2012. This chapter was written without taking into account the latest advances in on-field reliability, in fact, copy the text of previous building codes that were written at a time when the theory of reliability was not, or she just created. Concepts such as the ringing of a water supply system, a time limit in the repair of previously issued building codes were introduced with help common sense and intuition. Now, when the theory of reliability is quite developed, these concepts have a place in its general context, but no way characterize the reliability of the object as a whole. Banding water supply system is one of its kinds of backup (but not the only one!), and the repair time is one of the indicators of maintainability.

In the current edition of the normative document is no concept of reliability of water supply network, which is characterized by the time the object has its function-tions. With amazing perseverance ignored the order of the former Ministry of Regional Development of the Russian Federation № 48, issued in 2008, in which such a concept was formulated. Availability such existing rules of designing a water supply system does only harm, which is must be corrected immediately.

K e y w o r d s: reliability, water supply network, design standards, a good state, the order number 48 of 2008 Ministry of Regional Development of the Russian Federation, a faulty state.

REFERENCES

1. Makagonov V.S. Issledovanie nadezhnosti vodoprovodnykh setey: aftoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Research of reliability of water supply networks: abstract of the thesis of cand. tech. sciences]. Moscow, MISI, 1972. (in Russia)
2. Galperin E.M. Opredelenie nadezhnosti funktsionirovaniya kol'tsevoy vodoprovodnoy seti [Determination of reliability of functioning of the annular water supply network]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitation]. 1989. No. 6. Pp. 11–13. (in Russia)
3. Galperin E.M. Metodika rascheta kol'tsevykh SPRV i sootvetstvuyushchie razdely SNiP 2.04.02–84 ne otrazhayut real'nost'i trebovaniya zhizni [The methodology for calculating the ring SPRV and relevant sections of the SNiP 2.04.02-84 do not reflect the reality and demands of life]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary engineering]. 1996. No. 8. Pp. 6–7. (in Russia)
4. Moshnin L.D. Uskorit' korrektirovku normativov po proektirovaniyu i ekspluatatsii system vodosnabzheniya [Speed up the adjustment of standards for the design and operation of water supply]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary engineering]. 1996. No. 8. Pp. 3–5. (in Russia)
5. Somo M.A., Zhurbina M.G. Vodosnabzhenie. T. 1. Sistema podachi i raspredeleniya vody: uchebnik dlya vuzov [Water supply. Vol. 1. Water supply and distribution system: a textbook for high schools]. Moscow, Publishing House of the ACB, 2010. (in Russia)
6. Khramenkov S.V., Primin O.G. Otsenka nadezhnosti truboprovodov sistemy vodosnabzheniya Moskvy [Evaluation of reliability of pipelines Moscow water supply system]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary engineering]. 1999. No. 7. (in Russia)
7. Primin O.G. Analiz faktorov, vliyayushchikh na nadezhnost' i ekologicheskuyu bezopasnost' vodoprovodnoy seti [Analysis of factors affecting the reliability and environmental safety of the water supply network]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary engineering]. 2014. No. 7. (in Russia)
8. Wenzel' E.S. Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya [Research operations: objectives, principles, methodology]. Moscow, Nauka, 1986. 203 p. (in Russia)

9. Gnedenko B.V., Kovaleenko I.N. Vvedenie v teoriyu massovogo obsluzhivaniya [Introduction to queuing theory]. 2nd ed., revised. and ext. Moscow, Nauka, 1987. 336 p. (in Russia)
10. Prikaz Ministerstva regional'nogo razvitiya ot 14 aprelya 2008 g. № 48 «Ob utverzhdenii Metodiki provedeniya monitoringa vypolneniya proizvodstvennykh i investitsionnykh program organizatsiy» [Order of the Ministry of Regional Development of April 14, 2008 N 48 «On approval of the Methodology of monitoring the implementation of production and investment programs of organizations»]. Elektronnyy resurs [Electronic resource]. (in Russia)
11. Gal'perin E.M. Eshche raz o nadezhnosti funktsionirovaniya vodoprovodnoy seti [Once again about the reliability of operation of the water supply network]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2014. No. 5. Pp. 49–55. (in Russia)

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.542.001

М.П. ДМИТРИЕВ, Д.Э. АБРАМЕНКОВ, В.А. ГВОЗДЕВ, Э.А. АБРАМЕНКОВ

ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ УДАРНЫЙ МЕХАНИЗМ МОЛОТА С РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ КАМЕРОЙ, КАМЕРОЙ ФОРСАЖА И КАМЕРОЙ ТОРМОЖЕНИЯ И ЕГО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Рассматривается анализ известных и синтезированных принципиальных схем пневмоударных механизмов с центральной трубкой воздуховода.

Ключевые слова: пневмоударный механизм, камера форсажа, камера торможения, давление воздуха, температура воздуха, ударник, канал перепуска, предкамера.

Рассматриваются оригинальные конструктивные решения пневмоударных механизмов с наибольшим количеством общих существенных признаков-элементов, известных из классификации [1, 2]. Принципиальные схемы представлены в хронологическом порядке, что позволяет проследить, может быть и не строго и полно, но усмотреть тенденции совершенствования конструктивных решений пневмоударных механизмов данного типа [1].

Классификация признаков-элементов трубчатых воздухоподводящих и воздухоотводящих решений представлена в [2].

Аналоги рассматриваемого типа пневмоударных механизмов с трубчатым воздухоотводом содержат принципиальные схемы (рис. 1–4), краткое описание устройства и недостатки.

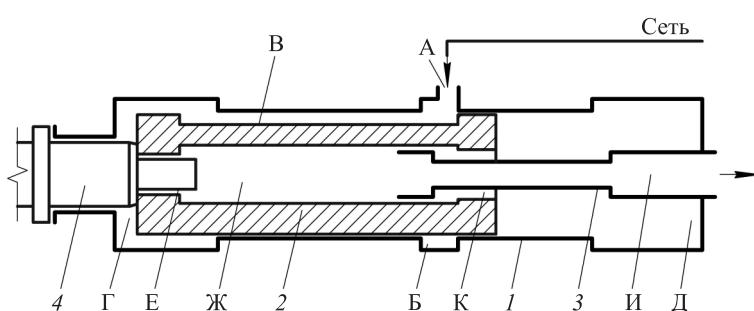


Рис. 1. Принципиальная схема пневмоударного механизма

Сжатый воздух из сети по каналу А поступает в выточку Б из цилиндра 1, откуда в зависимости от положения ударника 2 по лыске-каналу В – в выточку кольцевой управляемой камеры Д рабочего хода.

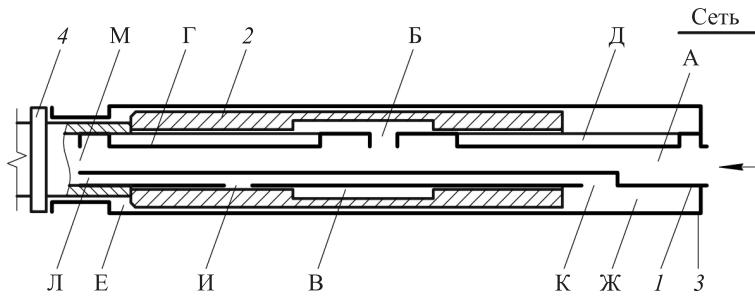


Рис. 2. Принципиальная схема пневмоударного механизма

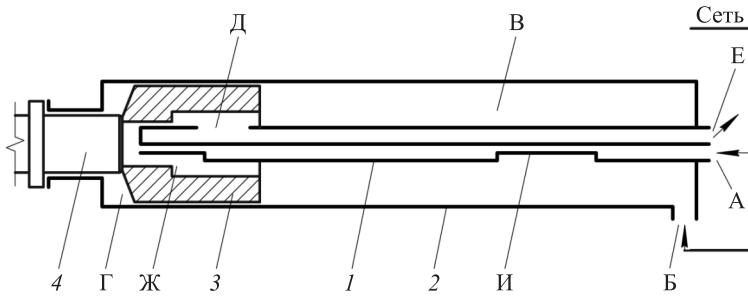


Рис. 3. Принципиальная схема пневмоударного механизма

Опорожнение камер Г и Д в окружающее пространство осуществляется попеременно: камеры Г – через выпускной канал Е камеры Ж атмосферного давления, размещенной в полости ударника, и выпускной канал И трубки 3; камеры Д – через кольцевую проточку-канал К трубки и ее канал И.

Под действием разности силовых импульсов со стороны камер Г и Д ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по инструменту ⁴¹.

Как видно из рис. 1, трубка воздухоотвода ступенчатая с выточкой, что потребовало выполнения на хвостовике инструмента дополнительного признака-элемента в виде стержня, перекрывающего выпускной канал из камеры холостого хода. Ударник и цилиндр снабжены выточкой или пазом, или лыской для распределения впуска воздуха между камерами рабочего и холостого хода, которые снабжены также выточками в цилиндре.

Недостатком конструктивного решения является выполнение пустотелого ударника с выточкой изнутри, что усложняет технологию его изготовления. Рассматриваемая схема представляет механизм с зависимым ходом ударника от его длины, а поэтому размеры и масса таких типов механизмов для ручных машин являются нежелаемыми.

Принципиальная схема, представленная на рис. 2, снабжена много-канальной трубкой.

Сжатый воздух из сети поступает в канал А трубки 1 и через радиальный выпускной канал Б в ней в кольцевую расточку В ударника 2 и в зависимости от его положения попеременно по пазам Г и Д в кольцевую управляемую камеру Е холостого хода и камеру Ж рабочего хода, расположенные в цилиндре 3².

¹ Pat. 766864 Franc. Martean pneumatique sans sonpapes / M.C. Schmal. Publ. 1934.

² А.с. 470608 СССР. Погружной пневмоударник/ А.М. Ашавский, Г.П. Неретин, М.И. Оноцкий и др. Опубл. 1975; Бюл. № 18.

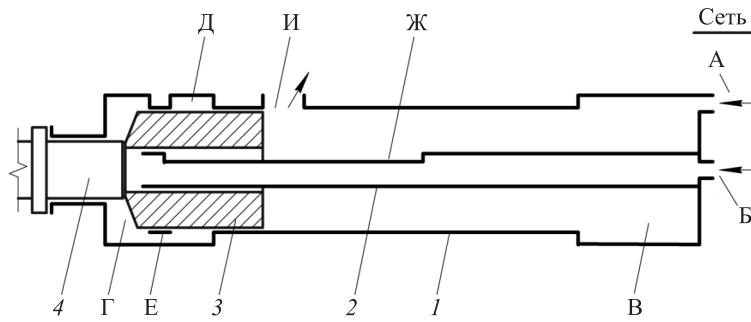


Рис. 4. Принципиальная схема пневматического механизма

Под действием разности силовых импульсов в камерах Е и Ж ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по инструменту 4.

Камеры Е и Ж попеременно опорожняются через радиальные выпускные каналы И и К и продольный канал Л в трубке с его продолжением в инструменте. Канал А в трубке может быть снабжен открытым дросселем М.

Недостатком данного решения является применение многоканальной трубы с двумя каналами: впуска с перепуском посредством двух пазов Г и Д на боковой поверхности трубы и распределительным каналом Б, для функционирования которого требуется выточка В в ударнике, взаимодействующая также с пазами; выпуска с двумя радиальными каналами К и И для камеры рабочего и холостого хода. Такое исполнение приводит к основному недостатку: зависимости хода ударника от его длины. Исполнение многоканальной трубы представляет технологическую сложность.

Сжатый воздух из сети по дроссельным каналам А в трубке 1 и Б в цилиндре 2 поступает в управляемые камеры холостого Г и рабочего В хода (см. рис. 3).

Опорожнение камер В и Г осуществляется попаременно в зависимости от положения ударника 3 через щелевой дроссель Д и выпускной канал Е в трубке. Под действием разности силовых импульсов со стороны обеих камер ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по инструменту 4³.

На боковой поверхности трубы расположены лыски И и Ж, предназначенные для вытеснения воздуха из камеры Г и В.

Недостатки: двухканальная трубка с одним тупиковым каналом и щелевым радиальным каналом выпуска для обеих камер; на впуске канал выполнен с двумя лысками, взаимодействующими с ударником, что придало каналу ступенчатую форму, а ударнику – выполнение с внутренней проточкой с выходом в камеру рабочего хода. Отмеченное потребовало увеличения диаметрального сечения трубы и цилиндра, а также снизило прочность ударника из-за проточки в нем.

Сжатый воздух из сети постоянно поступает через открытые дроссели А в цилиндре 1 и Б в трубке 2 в управляемые камеры рабочего В и холостого Г, Д хода (см. рис. 4). Камеры Г и Д сообщены постоянно посредством дросселя перепуска Е. Периодически, при некоторых промежуточ-

³ А.с. 1061982 СССР. Пневматический молоток / Э.А. Абраменков, А.Г. Богаченков, В.П. Брызгалов. Опубл. 1983; Бюл. № 47.

ных положениях ударника 3, камеры В, Г и Д сообщаются между собой через лыски Ж на трубке.

Опорожнение камер В, Г и Д осуществляется попеременно через щелевой канал И.

Под действием разности силовых импульсов со стороны камер В, Г и Д ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по инструменту ⁴.

Недостатки: одноканальная трубка выполнена с пазом или лыской на боковой поверхности для перепуска воздуха между камерой рабочего и холостого хода при взаимодействии с ударником. Цилиндр выполнен со стороны основной камеры холостого хода с дополнительной кольцевой камерой, сообщенной с основной камерой посредством перепускного канала в переходе цилиндра между камерами, что существенно усложняет технологию изготовления цилиндра.

Исключая в вышеупомянутых четырех решениях признаки-элементы конструкций и оставляя только относящиеся к системе воздухораспределения, сделана попытка, применив классификации признаков-элементов [1, 2], создать (синтезировать) пневмоударный механизм с несколькими камерами различного назначения со стороны рабочего хода ударника. Здесь опущена последовательность и причины выбора конкретных признаков-элементов, что связано с ограничением объема статьи данного типа.

Синтезированный вариант пневмоударного механизма представлен на рис. 5 с последующим описанием его устройства и рабочего процесса.

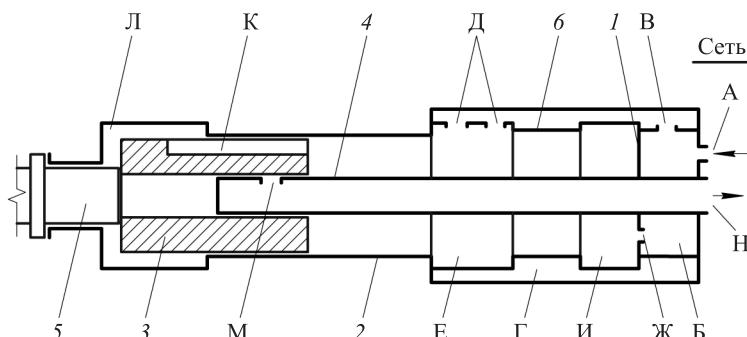


Рис. 5. Принципиальная схема синтезированного пневмоударного механизма

Сжатый воздух из сети поступает по каналу А с проходным сечением ω_C в предкамеру Б в фланце 1 массой m_F с объемом V_{TP} , откуда одновременно через впускной канал В с проходным сечением ω_{TP} в стенке фланца в кольцевую камеру форсажа Г с объемом V_F и через впускной канал Д с проходным сечением ω_F в стенке цилиндра 2 массой m_C в распределительную камеру Е с объемом V_{KP} и через канал Ж с проходным сечением ω_T в крышке фланца в тормозную камеру И с объемом V_T рабочего хода.

Из распределительной и тормозной камер воздух поступает по каналу-пазу К (или лыске, или проточке) с проходным сечением ω_X на боковой поверхности ударника 3 массой m_Y в камеру Л с объемом V_X холостого хода.

⁴ А.с. 1172692 СССР. Пневматический молоток / Э.А. Абраменков, А.Г. Богаченков, В.П. Брызгалов. Опубл. 1985; Бюл. № 30.

Опорожнение камер И, Е и Л осуществляется в зависимости от положения ударника через радиальный канал М с проходным сечением ω_{AT} в стенке глухой трубы 4 массой m_T и далее по ее проходному каналу через выпускной канал Н с проходным сечением $\omega_A \gg \omega_{AT}$ в атмосферу.

Под действием разницы силовых импульсов давления воздуха со стороны камер И, Е и Л ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по хвостовику инструмента 5. После первого соударения ударник движется под действием силовых импульсов давления воздуха и импульса отскока.

Ударник снабжен сквозным отверстием для пропуска трубы, которая закреплена относительно стакана 6 массой m_C .

Физико-математическое описание синтезированного пневмоударного механизма выполнено в соответствии с приведенным описанием рабочего процесса.

Введены обозначения к расчетной схеме пневмоударного механизма (рис. 6):

$V_X, V_{KP}, V_T, V_1, V_2, V_{TP}, V_\Phi$ – объемы камер: холостого хода, распределительной, тормозной, ограниченной участком ($h-q$), и участком ($m-n$), торцевой предкамеры, форсажа;

$\omega_{TP}, \omega_{KP}, \omega_T, \omega_\Phi$ – проходные сечения каналов впуска в камеры с объемами $V_{TP}, V_X, V_{KP}, V_T, V_1, V_2, V_\Phi$;

$\omega_C, \omega_{AT}, \omega_{AA}$ – проходные сечения каналов впуска в камеру с объемом V_{TP} , выпуска из камеры с объемом V_X в атмосферу;

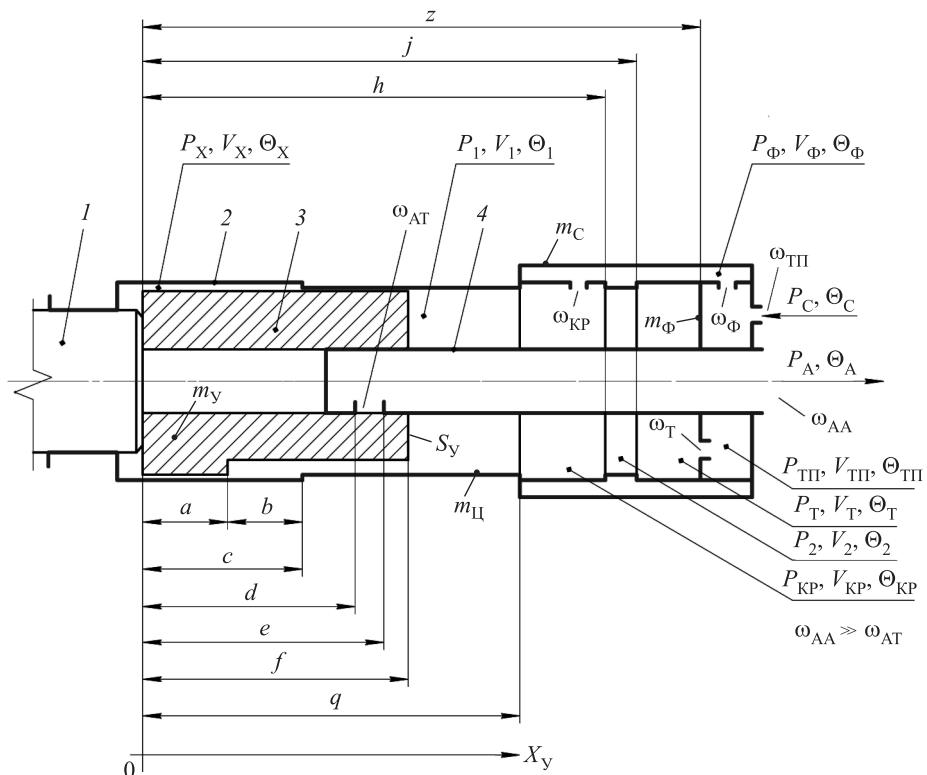


Рис. 6. Расчетная схема синтезированного пневмоударного механизма

$P_C, P_A, P_X, P_{KP}, P_T, P_\Phi, P_1, P_2, P_{TP}$ – давление воздуха в сети, атмосфере, камерах холостого хода, распределительной, тормозной, форсажа, с объемами V_1 и V_2 , торцевой предкамере;

$\theta_C, \theta_A, \theta_X, \theta_{KP}, \theta_T, \theta_\Phi, \theta_1, \theta_2, \theta_{TP}$ – температура воздуха в сети, атмосфере, камерах с объемами $V_X, V_{KP}, V_T, V_1, V_2, V_{TP}, V_\Phi$;

$\varphi_X, \varphi_{KP}, \varphi_T, \varphi_\Phi, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_{TP}$ – коэффициенты бародинамического процесса в камерах с объемами $V_X, V_{KP}, V_T, V_\Phi, V_1, V_2, V_{TP}$;

$\Omega_X, \Omega_{KP}, \Omega_T, \Omega_\Phi, \Omega_1, \Omega_2, \Omega_{TP}$ – коэффициенты термодинамического процесса в камерах с объемами $V_X, V_{KP}, V_T, V_\Phi, V_1, V_2, V_{TP}$;

$W = (2kR/(k-1))^{1/2}$, где k, R – показатель процесса и газовая постоянная;

S_y, m_y, L_y – рабочая диаметральная (кольцевая) площадь, масса и длина между отсекающими кромками ($q - a$) ударника;

m_K – масса корпуса, равная $m_\Phi + m_\Gamma + m_T + m_C$, где массы фланца, цилиндра, трубки, стакана;

k_y, k_K – коэффициенты отскока ударника и корпуса от буртика рабочего инструмента;

$\left(\frac{dx_y}{dt} \right)_o, \left(\frac{dx_y}{dt} \right)_y$ – скорости отскока и удара ударника;

$\left(\frac{dx_K}{dt} \right)_o, \left(\frac{dx_K}{dt} \right)_y$ – скорость отскока и соударения корпуса с буртиком рабочего инструмента;

F_H – усилие нажатия на корпус молота;

$d^2x_y/dt^2, d^2x_K/dt^2$ – ускорения движения ударника и корпуса;

$a, b, c, d, e, f, q, h, j, z$ – геометрические размеры длин между характерными отсекающими кромками.

Геометрические формы площадей сечений каналов впуска, перепуска, выпуска приняты квадратными.

Ограничения для φ_j и φ_i –

$$\varphi_j \equiv \varphi_i = \begin{cases} 0,5283 > P_i / P_j & P_i \cdot \Theta_i^{1/2} \cdot 0,2588, \\ 0,5283 \leq P_i / P_j & P_i \cdot \Theta_i^{1/2} ((P_i / P_j)^{2/k} - (P_i / P_j)^{(k+1)/k})^{1/2}, \\ 0,5283 > P_i / P_j & P_j \cdot \Theta_j^{1/2} \cdot 0,2588, \\ 0,5283 \leq P_i / P_j & P_j \cdot \Theta_j^{1/2} ((P_j / P_i)^{2/k} - (P_j / P_i)^{(k+1)/k})^{1/2}. \end{cases} \quad (1)$$

Ограничения для Ω_i и Ω_j –

$$\Omega_j \equiv \Omega_i = \begin{cases} \varphi_i > 0 & k-1, \\ \varphi_i \leq 0 & k-\Theta_i / \Theta_j, \\ \varphi_j > 0 & k-1, \\ \varphi_j \leq 0 & k-\Theta_j / \Theta_i. \end{cases} \quad (2)$$

Бародинамическая составляющая рабочего процесса предкамеры и камеры форсажа –

$$\begin{cases} \frac{dP_\Phi}{dt} = \frac{k}{V_\Phi} [W(\omega_{TP}\varphi_{TP} - \omega_\Phi\varphi_\Phi)], \\ \frac{dP_{TP}}{dt} = \frac{k}{V_{TP}} [W(\omega_C\varphi_C - \omega_P\varphi_P - \omega_{TP}\varphi_{TP})]. \end{cases} \quad (3)$$

Бародинамическая составляющая рабочего процесса для камер холостого хода –

$$\begin{aligned} \frac{dP_X}{dt} = & \frac{k}{(V_X + x_y S_y)} \times \\ & \times \left[W(\omega_X(x_y) \varphi_X + \omega_{KP}(x_y) \varphi_{KP} - \omega_{AT}(x_y) \varphi_{AT}) - P_X \frac{dx_y}{dt} S_y \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Бародинамическая составляющая рабочего процесса для камер рабочего хода –

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = \frac{k}{((V_1 + V_{KP} + V_2 + V_T) - x_y S_y)} \times \\ \times \left[W(\omega_p \varphi_p + \omega_{KP} \varphi_{KP} \pm \omega_X(x_y) \varphi_X) + P_1 \frac{dx_y}{dt} S_y \right], \\ \frac{dP_{KP}}{dt} = \frac{k}{((V_{KP} + V_2 + V_T) - x_y S_y)} \times \\ \times \left[W(\omega_p \varphi_p + \omega_{KP} \varphi_{KP} \pm \omega_X(x_y) \varphi_X) + P_{KP} \frac{dx_y}{dt} S_y \right], \\ \frac{dP_2}{dt} = \frac{k}{((V_2 + V_T) - x_y S_y)} \times \\ \times \left[W(\omega_p \varphi_p + \omega_{KP} \varphi_{KP} \pm \omega_X(x_y) \varphi_X) + P_2 \frac{dx_y}{dt} S_y \right], \\ \frac{dP_T}{dt} = \frac{k}{V_T - x_y S_y} \times \\ \times \left[W(\omega_p \varphi_p + \omega_{KP} \varphi_{KP}) + P_T \frac{dx_y}{dt} S_y \right]. \end{cases} \quad (5)$$

Термодинамическая составляющая рабочего процесса предкамеры и камеры форсажа –

$$\begin{cases} \frac{d\theta_{TP}}{dt} = \frac{\theta_{TP}}{P_{TP} V_{TP}} [W(\omega_C \varphi_C \Omega_C - \omega_p \varphi_p \Omega_p - \omega_{TP} \varphi_{TP} \Omega_{TP})], \\ \frac{d\theta_\Phi}{dt} = \frac{\theta_\Phi}{P_\Phi V_\Phi} [W(\omega_{TP} \varphi_{TP} \Omega_{TP} - \omega_{KP} \varphi_{KP} \Omega_{KP})]. \end{cases} \quad (6)$$

Термодинамическая составляющая рабочего процесса для камер рабочего хода –

$$\begin{cases} \frac{d\theta_1}{dt} = \frac{\theta_1}{P_1 ((V_1 + V_{KP} + V_2 + V_T) - x_y S_y)} \times \\ \times \left[W \left(\omega_p \varphi_p \Omega_p \pm \omega_X(x_y) \varphi_X \Omega_X + \omega_{KP} \varphi_{KP} \Omega_{KP} + (k-1) P_1 \left(\frac{dx_y}{dt} \right) S_y \right) \right], \\ \frac{d\theta_{KP}}{dt} = \frac{\theta_{KP}}{P_{KP} ((V_{KP} + V_2 + V_T) - x_y S_y)} \times \\ \times \left[W \left(\omega_p \varphi_p \Omega_p + \omega_X(x_y) \varphi_X \Omega_X \pm \omega_{KP} \varphi_{KP} \Omega_{KP} + (k-1) P_A \left(\frac{dx_y}{dt} \right) S_y \right) \right], \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \frac{d\theta_2}{dt} = \frac{\theta_2}{P_2((V_2 + V_T) - x_y S_y)} \times \\ \times \left[W \left(\omega_p \varphi_p \Omega_p \pm \omega_x(x_y) \varphi_x \Omega_x + \omega_{kp} \varphi_{kp} \Omega_{kp} + (k-1) P_2 \left(\frac{dx_y}{dt} \right) S_y \right) \right], \\ \frac{d\theta_T}{dt} = \frac{\theta_T}{P_T(V_T - x_y S_y)} \times \\ \times \left[W(\omega_p \varphi_p \Omega_p + \omega_{kp} \varphi_{kp} \Omega_{kp} + \omega_A \varphi_A \Omega_A) + (k-1) P_T \left(\frac{dx_y}{dt} \right) S_y \right]. \end{cases} \quad (7)$$

Термодинамическая составляющая рабочего процесса для камер холостого хода –

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_X}{dt} &= \frac{\theta_X}{V_X + x_y S_y} \times \\ &\times \left[W(\omega_x(x_y) \varphi_x \Omega_x + \omega_{kp}(x_y) \varphi_{kp} \Omega_{kp} - \omega_{AT}(x_y) \varphi_{AT} \Omega_{AT}) - \right. \\ &\left. - (k-1) P_X \left(\frac{dx_y}{dt} \right) S_y \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Ограничения для x_y и x_k –

$$\begin{cases} \left(\frac{dx_y}{dt} \right)_0 = -k_y \left(\frac{dx_y}{dt} \right)_y \text{ при } x_y \leq 0, \\ \left(\frac{dx_k}{dt} \right)_0 = -k_k \left(\frac{dx_k}{dt} \right)_y \text{ при } x_k \leq 0. \end{cases} \quad (9)$$

Баромеханическая составляющая рабочего процесса –

$$\begin{cases} \frac{d^2 x_y}{dt^2} = (P_X S_y - P_1 S_y - P_2 S_y - P_{kp} S_y - P_T S_y) / m_y & \text{при } x_y > 0, \\ \frac{d^2 x_k}{dt^2} = (P_X S_y - P_1 S_y - P_2 S_y - F_H - P_{kp} S_y - P_1 S_y) / m_k & \text{при } x_k > 0. \end{cases} \quad (10)$$

Ограничения для координаты выпуска воздуха из камеры холостого хода

$$\omega_{AT} = \begin{cases} 0 < x_y < d & \omega_{AT} = 0, \\ d < x_y \leq e & \omega_{AT} = 0.5 \max \omega_{AT}, \\ e < x_y & \omega_{AT} = \max \omega_{AT}. \end{cases} \quad (11)$$

Ограничения для координат перепуска воздуха в камеру холостого хода из камер рабочего хода при $\omega_\Phi = \text{const}$ и $\omega_T = \text{const}$ –

$$\omega_X = \begin{cases} 0 < x_y < c & \omega_X = \max \omega_X, \\ a < x_y \leq c & \omega_X = 0.5 \max \omega_X, \\ x_y \geq c & \omega_X = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Площадь сечения ω_X подсчитывается с учетом формы сечения канала: паза (квадрата) или лыски (сегмента).

Рекомендации по определению параметров d , e , ω_T , ω_ϕ : применять методику [3] инженерного расчета дроссельного пневмоударного механизма и принять

$$\omega_A \gg \omega_{AT}; \omega_{KP} = \omega_\phi; V_1 + V_2 + V_{KP} + V_T = V_p; \lambda = \frac{V_p}{V_x} = 7; \alpha = \frac{\omega_p \lambda}{\omega_x} = 3.$$

Методика инженерного расчета [3] предусматривает, что известны (заданы) значения следующих параметров: энергии единичного удара (A); частота ударов (i); давление сжатого воздуха (P_C), подводимого из сети к механизму; ожидаемый коэффициент отскока ударника от хвостовика инструмента (k_O); скорость ударника при соударении (u_y); универсальная газовая постоянная (R). Дополнительно определяются значения безразмерных коэффициентов:

q_v , λ , ε , τ , v [3], зависящие от k_O (см. таблицу).

Значения безразмерных коэффициентов в зависимости от коэффициента отскока k

k_O	λ	ε	τ	v	q_v
0,00	7	2,60	2,5	5,45	1,08
0,20	7	2,67	2,2	5,60	1,08
0,30	7	2,85	2,8	5,40	1,08

Сообщения с атмосферой исключается из общего расхода воздуха, поскольку она отключена от камеры, сообщенных с сетью.

Методика инженерного расчета [3] пневмоударного механизма позволяет определить значения геометрических параметров в соответствии с заданными энергетическими параметрами.

Для моделирования рабочего процесса и определения уточненных значений геометрических параметров достаточно воспользоваться системами уравнений (1)–(12) с ограничениями к ним, где коэффициенты расходов воздуха каналов впуска, выпуска и перепуска приняты равными единице и требуют уточнения и учета при определенных геометрических размерах каналов.

Выводы. В сравнении с рассматриваемыми аналогами пневмоударных механизмов с трубчатым выпуском отработавшего воздуха синтезированный механизм позволяет: 1) осуществить выпуск воздуха только из камеры холостого хода и исключить непроизводительный расход воздуха; 2) реализовать простое конструктивное и технологическое решение по изготовлению ударника и трубки, повысив их прочностные качества и ресурс; 3) выполнить трубку одноканальной, обеспечив большее проходное сечение, более полный выпуск отработавшего воздуха, меньшее противодавление воздуха со стороны камеры холостого хода и торможение ударника перед ударом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абраменков Э.А., Абраменков Д.Э. Пневматические механизмы машин ударного действия. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1993. 430 с.
2. Кутумов А.А., Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А. Навесные пневматические молоты для разработки мерзлых грунтов: монография. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2008. 376 с.

3. Петреев А.М., Абраменков Э.А., Клужин Н.А., Липин А.А. Методика расчета и рекомендации по доводке дроссельного пневмоударного механизма // Сб. трудов. Ручные пневматические машины ударного действия. Новосибирск: ИГД СО РАН СССР, 1979. С. 53–60.

Дмитриев Михаил Петрович, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Абраменков Дмитрий Эдуардович, д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Гвоздев Владимир Алексеевич, канд. техн. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Абраменков Эдуард Александрович, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 25.11.15

Dmitriev Mikhail Petrovich, Post-graduate Student

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Abramenkov Dmitriy Eduardovich, DSc, Professor

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Gvozdev Vladimir Alexeevich, PhD, Ass. Professor,

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Abramenkov Eduard Alexandrovich, DSc, Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

AIR PERCUSSION MECHANISM OF HUMMER WITH THE DISTRIBUTIVE CHAMBER, FORsing CHAMBER AND BREAKING CHAMBER AND ITS PHYSICO-MATHEMATICAL DESCRIPTION

The analysis of well-known and synthesized fundamental charts of air percussion mechanisms with the central tube of air-duct.

Key words: air percussion mechanism, chamber of forcing, braking chamber, pressure of air, temperature of air, shock-worker, bypass channel, prechamber.

REFERENCES

1. Абраменков Е.А., Абраменков Д.Е. Пневматические механизмы машин ударного действия [Pneumatic mechanisms of impact machines: throttle, inkjet, without spool, valveless: Ref. manual]. Novosibirsk, Publishing house Novosib. University, 1993. 430 p. (in Russia)
2. Кутумов А.А., Абраменков Д.Е., Абраменков Е.А. Навесные пневматические молоты для разработки мерзлых грунтов: монография [Mounted pneumatic hammers for frozen ground excavation: monograph]. Novosibirsk, NSUACE (Sibstrin), 2008. 376 p. (in Russia)
3. Петреев А.М., Абраменков Е.А., Клужин Н.А., Липин А.А. Методика расчета и рекомендации по доводке дроссельного пневмоударного механизма. Сборник трудов. Ручные пневматические машины ударного действия. Collection of scientific papers. Hand-held pneumatic percussion machines]. Novosibirsk, Institute of Mining, Siberian Branch, Academy of Sciences of the USSR, 1979. Pp. 53–60. (in Russia)

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

УДК 711.4–112(571.1/.5)

М.В. БЕЖАНОВА, Л.Н. ВОЛЬСКАЯ

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ОРГАНИЗАЦИИ АРХИТЕКТУРНЫХ АНСАМБЛЕЙ В КРУПНЫХ ГОРОДАХ СИБИРИ

Названы и проанализированы основные принципы формирования архитектурных ансамблей крупных исторических городов Сибири, которые связаны с историко-социальными и экономическими особенностями развития региона, повлиявшими на композицию исторических центров, ансамблями, имеющими архитектурно-градостроительную ценность в сибирской культуре.

Ключевые слова: композиция города, система центров, планировочный каркас, архитектурные доминанты.

В начале XXI в. в связи с активизацией агломерационных процессов на территории Западной Сибири сформировались Новосибирская, Томская, Омская, Барнаульская агломерации с определенными приоритетными направлениями социоэкономического развития. Центрами агломераций стали города Новосибирск, Томск, Омск, Барнаул, имеющие различную по исторической протяженности траекторию развития, что отразилось в планировочной структуре, архитектурно-пространственных решениях, формировании каркаса и узлов. Последние играют важнейшую роль в архитектурно-пространственной композиции города, так как в их состав входят значимые элементы: площади, образованные ансамблями застройки, в которых есть доминанты, важные для локального и для общегородского пространства и среды.

Анализ социально-культурной значимости вышеперечисленных городов – центров агломераций позволяет говорить о том, что они являются притягательными для населения агломераций и для жителей всей территории Западной Сибири, поскольку обладают полифункциональной системой, характерной для крупных и крупнейших сибирских городов, обеспечивающих процесс социально значимых потребностей общества.

Планировочно-пространственные композиции городов XVII–XVIII вв. связаны как с особенностями природного ландшафта, так и с антропогенной и природной инфраструктурой, что отразилось в масштабности застройки, ее системности и было присуще в основном историческим городам – Тюмени (1697 г.), Томску (1604 г.), Омску (1716 г.). Отметим, что исторические города изначально обладали в центральной части многими функциями: административно-деловой, торговой, культурно-просветительной, жилой. Это отразилось в ансамблях, создаваемых в досоветский период.

Анализируя архитектурно-планировочную композицию исторических городов Сибири, остановимся на основных принципах организации ансамблевой застройки: системности, преемственности, традиционности, индивидуальности, соподчиненности и гармоничности, рационального функционирования.

Каждый из них имеет свою историю и трактовку. Так, *принцип системности* характерен, когда сочетаются, синкетрируются особенности всех систем (природно-ландшафтных и антропогенных со своими подсистемами). Взаимодействие систем обеспечивает гармоничность ансамблей, застройки в городской среде. В Сибири есть исторические примеры этого, например, в Тобольске, Томске, Тюмени и других городах, где ансамбли возникали сразу же при основании городов, возведении застройки. Это ансамбль Тобольского кремля, монастырский ансамбль XVII–XVIII вв. в Тюмени и др. Сам город – динамическая система, как явствует из истории его развития, и ансамбли связаны с антропогенной деятельностью, подчиняются историческим закономерностям, характерным для каждого периода или эпохи, имея в своем арсенале инфраструктурную, планировочную, архитектурно-художественную и другие подсистемы. Принцип системности основной и характерный в создании и дальнейшем формировании систем застройки, архитектурно-художественных систем в архитектурных ансамблях центров Сибири, что особо ценно в понимании композиции городов любого исторического периода.

Принцип преемственности в организации ансамблей также прослеживается в сибирском градостроительстве при анализе формирования и развития исторических городов, с ним тесно связан *принцип традиционности*, столь характерный для сибирской архитектурно-градостроительной культуры, зарождение которой отмечается с конца XVI – начала XVII в., при активном освоении региона русскими, прибывавшими из северо-западной части России. Они привнесли мастерство, традиции и умение возводить первые зимовья, остроги, а главное, крепости, ставшие ядром и основой будущих городов, сохранивших свои особенности и к началу XXI в. Первое строительство зданий и сооружений XVII в. велось из дерева. В качестве своеобразного элемента-модуля была клеть, связанная с габаритами дерева, а северные российские мастера-умельцы традиционно могли возводить в короткие сроки необходимые для жизнеобеспечения строения, которые образовывали гармоничные деревянные ансамбли крепостей, о чем говорят рисунки художников XVIII в., запечатлевших их в своей графике. Это ансамбли Тобольска, Тюмени, Томска, Якутска и др.

В ансамблях, созданных в дереве XVII–XVIII вв., прослеживается традиция и преемственность с древнерусским зодчеством, например, в возведении православных храмов на территории крепостей (Спасская церковь в Зашиверске на территории Восточной Сибири, чудом сохранившаяся и в наше время), которые гармонично сочетаются с остальной застройкой, доминируя в пространстве. Все деревянные сооружения были экологичны, и все градостроительство XVII–XVIII вв. – это гармоничная градоэкологическая система, представлявшая собой синcretную корреляцию принципов системности, преемственности, традиционности.

Преемственность характерна и для планировки центра Омска. Так, изначально Омская крепость была в форме правильного пятиугольника,

обнесенного палисадом, с пятью бастионами и рвом. В ней находились деревянная церковь Сергия Радонежского, гауптвахта, канцелярия, двор старшего офицера, управительский двор и казармы. В 1740-е гг. Омская крепость была перестроена, ее территория увеличилась до шести гектаров, но по-прежнему имела форму неправильного пятиугольника с пятью бастионами [1].

Следует отметить, что принципы традиционности и преемственности в организации ансамблей в Сибири сохранились и в дальнейшем, при переходе к каменному строительству во второй половине XVIII–XIX вв. В этот период происходил рост сибирских городов, строительство велось по генеральным планам, большую роль играл планировочный каркас – улицы и площади, обогатившиеся каменными ансамблями. Ранее существовавшие ансамбли деревянных крепостей пришли в ветхость, их разобрали, а на этом месте появились ансамбли уже в камне, так как эта территория была ядром города. Ансамбли каменных зданий в ядре города были организованы на площадях, причем доминирующим сооружением был храм, в связи с этим площади носили одноименные с храмом названия – Спасская, Благовещенская и т.д. Иногда в бывшем ядре города (деревянной крепости) возникали два храма, как в старейшем Енисейске. Каменные храмы, согласно древнерусской традиции, планировочно имели моноцентрическую ось, последовательно нанизавшую на себя паперт, трапезную, молельный зал, алтарь, проходящую с запада на восток. Главный западный фасад организовывал весь ансамбль площади эстетически, в архитектурном стиле, присущем эпохе его создания. Ансамбль площадей ядра центра кроме храмов составляли в первой половине XIX в.: магистрат, биржа, иногда 2-3-этажные каменные здания богатых людей города [2].

В XIX в. кроме главных площадей с созданными на них ансамблями в сибирских городах организовывались и торговые площади, в которых превалировали расплаканные каменные доминанты – гостиные дворы, складывалась двуцентрическая композиция.

В связи с особенностями размещения застройки вдоль речных магистралей в XVII – начале XVIII в. в период деревянной застройки развитие городов продолжилось по линейной схеме, отвечающей корреляции природной и антропогенной систем, т.е. принцип преемственности пролонгировался как в планировочных градостроительных тенденциях, так и в планировке жилых каменных домов, где в качестве планировочного модуля была заложена клеть как модуль жилья.

Город, планировочно развиваясь линейно, образовывал со стороны реки интересные силуэт и панораму, в которых выделялись доминирующие в малоэтажной застройке ансамбли, образованные в планировочных узлах.

Анализируя исторические города в Сибири в целом, отметим их разнообразное архитектурно-пространственное решение, зависящее от исходной природно-ландшафтной ситуации, экономических особенностей основания и развития (города – промышленные центры с развитием «мануфактур»; города – административные центры и пр.).

Принцип индивидуальности в организации ансамбля зависит в основном от архитектурно-планировочного решения, его идеи в каждом городе, особенностей природного ландшафта, применения композиционных приемов в исторической среде и стилях, творчески осмысливших зодчими

в том или ином городе. Например, в XVIII в. – «Тобольское барокко», «Тюменское барокко», «Томское барокко», в конце XIX – начале XX в. «Томский модерн» в деревне.

В XIX – начале XX в. в сибирских городах, созданных в них ансамблях, индивидуальность которых подчеркивалась местоположением в планировочной структуре, связанной и с ландшафтными условиями, и с архитектурно-стилевой направленностью, отвечающей превалирующим в тот период архитектурным стилям, пришедшим в Сибирь с запада, возникли ансамблевые композиции, характеризующие индивидуальность архитектурно-пространственного решения. Так, например, в Тюмени застройка образовала своеобразную цепочку, вытянутую вдоль обрыва Туры: монастырь – кремль – посад – монастырь. Эта своеобразная линейность до конца XIX в. определила характер и силуэт города. В речной панораме ансамбль кремля занимал центральное место, однако позже с развитием города роль его силуэта будет снивелирована [3]. Городской планировочный каркас Новониколаевска до 1917 г. был тесно связан с особенностями элементов местного ландшафта: малыми речками, Ельцовкой, Каменкой; зелеными массивами, р. Обь и трассой Транссибирского железнодорожного пути, что сразу и продиктовало направление главных городских магистралей. Определился масштаб, местоположение центра города, выделилась его основная улица с двумя торговыми площадями. Среди однообразной квартальной застройки в то время особо выделялись вертикали церквей: собора А. Невского, церкви Св. Даниила, Закаменской и др., давших визуальные вертикальные акценты, формируя уникальный городской силуэт. В отличие от Томска и Тюмени в Новосибирске пересечение железной дороги и р. Обь изначально задало определенную планировочную структуру города, его каркас.

Принцип соподчиненности заключается в соразмерности, иерархичности, соподчиненности всех элементов (ординарных зданий фронтальной застройки, доминант) единому ансамблю – гармоничности «нового» со старым. Так, ансамбли застройки площадей имеют сложносочиненный или сложноподчиненный характер периметральной застройки, при котором в первом случае все здания гармонично сочетаются масштабно или стилистически, не подавляя друг друга. Например, Демидовская площадь в Барнауле имеет сложносочиненную систему, в которой одностильевые здания гармонично согласуются по высоте, масштабу, колориту. Во втором – подчиняются доминанте – зданию или комплексу, преобладающему в пространстве. Например, в ансамбле Войсковой площади в Омске доминанта – Казачья Никольская церковь, построенная по проекту В.П. Стасова в стиле классицизма, характеризующаяся простотой геометрических объемов. Знаменитый ансамбль начала XX в. – улица Ленина в Омске (бывший Любинский проспект) с фронтальной застройкой каменными зданиями стиля модерн. Застройка, благодаря единому стилю, сомасштабности, заключенной в применении схожих строительных материалов (застройка каменными зданиями), единого колористического решения с цветовым выявлением доминирующих элементов, способствовала созданию ансамбля.

Принцип рационального функционирования связан с отражением в архитектурных ансамблях превалирующих в каждый исторический период формирования сибирских городов функций. От оборонительных в XVII в.

(ансамбли деревянных крепостей), торгово-административных (ансамбли гостинодворских площадей со зданиями их формирующими в стиле барокко и др.) в XVIII в. до полифункциональных систем – образований (систем центров с подцентрами) различного назначения: культурного, транспортного, делового, складского, промышленного и т.д. в настоящее время.

Так, планировочная структура Барнаула, основанного в 1730 г., изначально зависела от рельефа местности и размещения медеплавильного завода. Характерной особенностью пространственно-планировочного решения города-завода являлась его компактность и наличие водоема. Архитектурно-композиционными доминантами, выделяющимися среди деревянной одноэтажной застройки в панораме города того времени, были Петропавловский собор, церкви Одигитрии и Иоанновская. Они подчеркивали основные композиционные оси и направления и выявляли исторический ландшафт. К 1748 г. поселок состоял из трех улиц, которые шли параллельно общему направлению береговой линии поймы р. Барнаул. При первоначальном линейном рисунке жилых порядков ясно выражены зачатки регулярной прямоугольной системы уличной сетки и кварталов. Этот линейный прием получил свое яркое выражение в последующей быстрорастущей застройке завода... Жилые порядки с каждым годом умножались численно и росли в длину, возникали новые ряды регулярных улиц. Эта регулярная сетка улиц увязывалась с природным рельефом местности, с очертанием береговых линий Оби и Барнаулки, а также с четкой прямоугольной формой территории завода [4].

В конце XIX в. с появлением таких градообразующих факторов, как научные и культурные центры, изменяются планировочные структуры и формируются новые городские районы, подцентры. Так, появление в Томске комплексов университета и Технологического института способствовало территориальному росту города, улучшению его благоустройства, социального состава населения и пр.

Совокупность всех принципов позволяет создать гармоничные в архитектурно-художественном аспекте композиции ансамблей, которые связаны и с особенностями природного ландшафта, и с инфраструктурой (природной и антропогенной), что и подтверждают сохранившиеся до нашего времени в исторических зонах неординарные архитектурные ансамбли, зачастую являющиеся памятниками градостроительного искусства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оглы Б.И. Строительство городов Сибири. Л.: Стройиздат, 1980. 272 с.
2. Вольская Л.Н. Архитектурно-градостроительное наследие Сибири. Новосибирск, 2008. 276 с.
3. Заварихин С.П., Жученко Б.А. Архитектура Тюмени. Тюмень: Изд-во «Радуга-Т», 2004.
4. Юдин М.А. Барнаульский сереброплавильный завод [Электронный ресурс]. URL: <http://new.hist.asu.ru/biblio/sudbi/B8.html> (дата обращения: 05.02.2013).

Бежанова Марина Викторовна, ст. препод.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Вольская Лариса Николаевна, д-р архит., проф.

Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств

Получено 15.12.15

Bezhanova Marina Viktorovna, Senior Lecturer

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Vol'skaya Larisa Nikolaevna, Doctor of Architecture, Professor

Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts, Russia

BASIC PRINCIPLES OF CREATION AND DEVELOPMENT OF ARCHITECTURAL ENSEMBLES IN THE LARGE CITIES OF SIBERIA

The article identified and analyzed the main principles of formation of architectural ensembles of major historical cities of Siberia, which are associated with historical and social and economic development of the region, influenced the composition of historic centres, ensembles, with architectural and urban value in the Siberian culture.

Key words: the composition of the city, the system of centers, planning frame, architectural dominants.

REFERENCES

1. O g l y B.I. Stroitel'stvo gorodov Sibiri [City building in Siberia]. Leningrad, Stroyizdat, 1980. 272 p . (in Russia)
 2. V o l 's k a y a L.N. Arkhitekturno-gradosrtoitel'noe nasledie Sibiri [Architectural and urban heritage of Siberia]. Novosibirsk, 2008. 276 p. (in Russia)
 3. Z a v a r u k h i n S.P., Z h u c h e n k o B.A. Arkhitektura Tyumeni [The Architecture of Tyumen]. Tyumen': Publishing House «Raduga-T», 2004. (in Russia)
 4. Y u d i n M.A. Barnaul'skiy serebroplavil'nyy zavod [Barnaul silver-refining plant]. Elektronnyy resurs [Electronic resource]. URL: <http://new.hist.asu.ru/biblio/sudbi/B8.html>. (date of access: 05.02.2013). (in Russia)
-

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 532.542

Л.И. ВЫСОЦКИЙ

ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВОЙ МОДЕЛИ СТРОЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПРОДОЛЬНО-ОДНОРОДНЫХ ПОТОКОВ ПРИ АНАЛИЗЕ ИХ ПАРАМЕТРОВ

Часть I

Рассмотрены некоторые проблемы определения наиболее важных параметров турбулентных продольно-однородных потоков с помощью новой аналитической зависимости, прошедшей проверку в широком диапазоне значений чисел Рейнольдса и относительных шероховатостей. Обосновывается преимущество этого метода.

Ключевые слова: формула Кольбрука, формула Прандтля, число Рейнольдса, дефицит скорости, новая модель строения турбулентного потока.

Как известно, основной задачей гидромеханики является определение закона распределения скоростей в потоке жидкости, в том числе и в осредненных турбулентных потоках.

Относительно формул для распределения осредненных скоростей в простейших случаях продольно-однородных течений А.Д. Альтшуль высказался следующим образом [1]: «Ряд работ был направлен на уточнение зависимостей, предложенных Прандтлем для вполне шероховатых труб (работы К.К. Федяевского, Стриттера, Ф.А. Шевелева, автора и др.), с тем, чтобы установить, в какой мере эти зависимости справедливы для труб с шероховатостями, отличными от шероховатости по И. Никурадзе. Таким образом, все перечисленные работы вносили некоторые уточнения в установленные Прандтлем закономерности движения жидкости в гидравлически гладких и вполне шероховатых трубах. Что касается наиболее важной переходной зоны, то ее вообще не удалось охватить теоретическим анализом». И далее: «Еще меньше исследованы закономерности распределения скоростей в трубопроводах, работающих в переходной области, то есть в большинстве практически важных случаев, и для описания профиля скоростей в этой области не было предложено каких-либо зависимостей. В связи с этим важнейшая задача, стоящая перед исследователями, заключается в построении такой модели турбулентного потока, которая позволила бы получить зависимости для расчета и моделирования турбулентных течений в технических трубопроводах и для решения других конкретных прикладных задач».

Указанная задача в простейшем случае решается интегрированием корректного уравнения равномерного движения:

$$\frac{du}{dy} = \frac{u_*^2}{\nu + \nu_t} \left(1 - \frac{y}{L} \right), \quad (1)$$

где u и u_* – осредненная и динамическая скорости;

ν и ν_t – коэффициенты кинематической и турбулентной кинематической вязкости;

y – расстояние по нормали к стенке;

L – характерная длина ($L = r_0$, т.е. радиусу для круглой трубы и $L = H$, т.е. глубине для плоского потока со свободной поверхностью).

В безразмерной форме оно имеет вид

$$\frac{du^+}{dy^+} = \frac{\left(1 - \frac{y^+}{L^+} \right)}{1 + \frac{\nu_t}{\nu}}, \quad (2)$$

$$\text{где } u^+ = \frac{u}{u_*}; \quad y^+ = \frac{yu_*}{\nu}; \quad L^+ = \frac{Lu_*}{\nu}.$$

Решением уравнения (2) является выражение

$$u^+ = \int_0^{y^+} \frac{\left(1 - \frac{y^+}{L^+} \right)}{1 + \frac{\nu_t}{\nu}} dy^+. \quad (3)$$

Для реализации этого результата необходимо знать зависимость $\nu_t = \nu_t(y)$, т.е. закон распределения ν_t поперек потока. На то, чтобы получить данные расчетов, совпадающих с экспериментом, потребовалось почти сто лет усилий выдающихся исследователей. Уникальный вклад в решение проблемы был сделан Л. Прандтлем [2] на базе разработанной им полуэмпирической теории пути смешения. Затем предложенная им формула «обросла» целым роем поправочных коэффициентов. Решение проблемы может быть найдено и примитивным путем, достаточно «угадать» взаимосвязь ν_t с y . Эта задача была решена в [3, 4] с помощью вычислительного эксперимента на базе предложенной новой модели строения осредненных продольно-однородных потоков. Она является пятислойной и в отличие от всех существующих моделей в ней толщины всех слоев признаны переменными и зависящими от глобальных параметров Re_L и Δ/L , т.е. от числа Рейнольдса и относительной шероховатости. Однако главное отличие заключается в том, что в тонком слое, примыкающем к стенке, кинематический коэффициент турбулентной вязкости принимает отрицательное значение ($\nu_t < 0$). Данный факт категорически не приемлют многие исследователи. Тем не менее это не мешает им соглашаться с общепризнанными моделями, в которых осредненная скорость на расстоянии $y^+ < 5$ задается линейной зависимостью

$$u^+ = y^+. \quad (4)$$

Значит в указанных пределах (см. (2))

$$\frac{v_t}{v} = -\frac{y^+}{L^+} < 0. \quad (5)$$

Таким образом, еще раз установлено, что в вязком подслое в общепринятом случае фактически принимается существование контрградиентного течения жидкости. Более того, если принять по Т. Карману [5] (что также имеет широкое распространение), распределение осредненных скоростей в буферной зоне при значениях $y^+ = \frac{yu_*}{v}$ в диапазоне $5 < y^+ < 30$ по формуле

$$u^+ = 5 \ln y^+ + 3,05,$$

то в этом случае зона с отрицательной турбулентной вязкостью захватит часть и этого слоя.

Действительно, из этой зависимости имеем

$$\frac{du^+}{dy^+} = \frac{5}{y^+} \quad \text{или} \quad \frac{d\bar{u}}{dy} = \frac{5}{y} u_*. \quad (6)$$

Подставляя этот результат в уравнение (1), получим

$$\frac{5}{y} u_* = \frac{u_*^2}{v + v_t} \left(1 - \frac{y}{r_0} \right).$$

Отсюда

$$\frac{v_t}{v} = \frac{yu_*}{5v} \left(1 - \frac{y}{r_0} \right) - 1 = \frac{y^+}{5} \left(1 - \frac{y}{r_0} \right) - 1.$$

На границе зон $y^+ = 5$ получаем уже известный результат (5). Однако легко понять, что при еще некотором приращении $\Delta y^+ > 0$ турбулентная вязкость будет продолжать оставаться отрицательной.

Более того, если подобному анализу подвергнуть известное положение Л. Прандтля [2] о толщине ламинарного подслоя с линейным распределением скоростей, равной $\delta_z = 11,6 \frac{v}{u_*}$, то легко приходим к следующему

результату. Так как в пределах ламинарного подслоя $\frac{du}{dz} = \frac{u_*^2}{v}$, то уравнение (как и в предыдущем случае) принимает вид

$$\frac{u_*^2}{v} = \frac{u_*^2}{v + v_t} \left(1 - \frac{y}{L} \right).$$

Отсюда

$$1 + \frac{v_t}{v} = 1 - \frac{y}{L} \quad \text{или} \quad \frac{v_t}{v} = -\frac{y}{L},$$

т.е. тот же результат, согласно которому в данном случае должно быть $v_t < 0$ при $y < 11,6 \frac{v}{u_*}$. Этот результат Л. Прандтлем «обходится» допуще-

нием о строго ламинарном течении в рассматриваемом подслое, при котором принимается $v_t|_{\delta_L} \equiv 0$.

Однако при этом возникает противоречие. Дело в том, что при условии $v_t|_{\delta_L} \equiv 0$ уравнение принимает вид

$$1 = 1 - \frac{y}{L},$$

который удовлетворяется лишь в одном очевидном случае $\frac{y}{L} \equiv 0$.

Возможно, именно это обстоятельство привело к тому, что из исходного уравнения был изъят член $\frac{y}{L}$ (из-за малости y и т.п.) и придуман для введенной модели термин «слой постоянного касательного напряжения». Продолжим анализ. По Л. Прандтлю, начиная с границы ламинарного по-граничного слоя, т. е. при $y > 11,6 \frac{v}{u_*}$ коэффициент турбулентной вязко-

сти становится равным

$$v_t = \kappa u_* (y - \delta_L).$$

Это создает видимость удовлетворения граничного условия $v_t|_{z=\delta_L} = 0$.

На самом же деле уравнение (1) при $y = \delta_L$ примет вид

$$\frac{u_*^2}{v} = \frac{u_*^2}{v + v_t} \left(1 - \frac{\delta_L}{L}\right)$$

или

$$\frac{v_t}{v} = -\frac{\delta_L}{L}.$$

То есть на границе ламинарного подслоя v_t со всей очевидностью опять-таки оказывается *отрицательным*. Попытки игнорировать возникающие расхождения не являются убедительными.

В [3, 4] предложена модель строения турбулентного продольно-однородного потока, состоящая из пяти зон, в которых коэффициент турбулентной вязкости меняется, как показано на рис. 1. Из вводимых пяти зон две относятся к так называемому «турбулентному ядру», т.е. основной части турбулентного потока, в которой характер течения не подвержен влиянию твердых стенок. Пристеночный слой делится на три зоны.

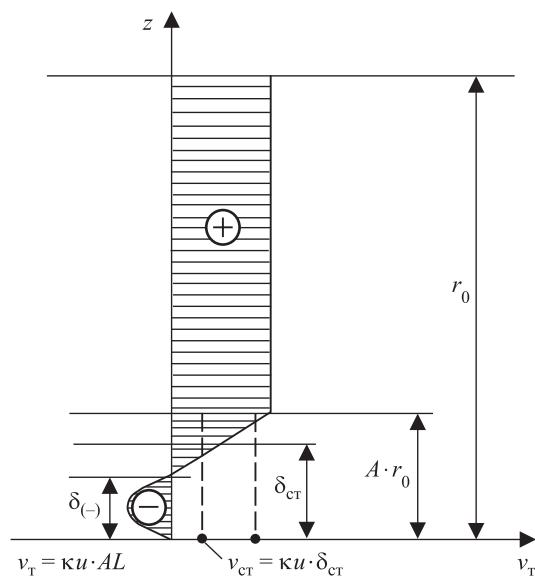


Рис. 1. Схема модели распределения коэффициента турбулентной вязкости по сечению продольно-однородного турбулентного потока при гладких стенках

Первая зона относится к внешней зоне турбулентного ядра толщиной $A \cdot L$, где L – либо радиус трубы r_0 , либо глубина плоского потока H .

В этой зоне $v_t > 0$ и близко к своему максимальному значению. Приблизенно можно для этой зоны принять $v_t \approx \text{const} = (v_t)_A$, т. е. равенство ее значению v_t в точке A (на границе между первой и второй зонами) $v_t = \kappa u_* A L$.

Ко второй зоне турбулентного ядра (внутренней), где коэффициент турбулентной вязкости убывает от значения $(v_t)_A$ до значения на границе с пристенным слоем v_{ct} , применимо соотношение (6). В этой зоне v_t заметно убывает по закону, который примем линейным (он широко известен):

$$v_t = \kappa u_* y, \quad (6)$$

где y – расстояние от гладкой стенки. Оно меняется в пределах $\delta_{ct} \leq y \leq A \cdot L$, где $A < 1$, а κ – константа Кармана.

Наличие такого графика позволяет аппроксимировать распределение v_t по всей толщине турбулентного потока и, следовательно, не прибегая к данным измерения осредненных скоростей (они нужны лишь для проверки полученных результатов), а путем прямого интегрирования (численного или аналитического) уравнения равномерного движения (1) получить данные о распределении осредненных скоростей.

При численном интегрировании уравнения (1) в пределах от $y = 0$ до $y = \delta_{ct}$ по методу трапеций или Симпсона получается набор универсальных данных (с некоторым шагом) о значениях осредненных скоростей в пристенном слое, т. е. представление их в табличной форме.

В [3, 4] получена единая аналитическая формула для расчета распределения осредненных скоростей при наличии любой из зон сопротивления и широкого диапазона значений относительных шероховатостей в виде:

– при доквадратичном сопротивлении

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{u_{ct}}{u_*} + \kappa^{-1} \left(\ln \frac{y}{\delta_{ct}} - \frac{y - \delta_{ct}}{L} \right), \quad \text{при } \delta_{ct} \leq y \leq A \cdot L; \quad (7)$$

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{u_{ct}}{u_*} + \kappa^{-1} \left(\ln \frac{AL}{\delta_{ct}} - A + \frac{\delta_{ct}}{L} \right) + (\kappa A)^{-1} \left[\frac{y}{L} \left(1 - 0,5 \frac{y}{L} \right) - A + \frac{A^2}{2} \right], \quad \text{при } y > A \cdot L; \quad (8)$$

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{u_{ct}}{u_*} + (\kappa A)^{-1} \left[\frac{y}{L} \left(1 - 0,5 \frac{y}{L} \right) - A + \frac{A^2}{2} \right], \quad \text{при } \delta_{ct} = A \cdot L, \quad (9)$$

где $u_{ct} = u|_{y=\delta_{ct}}$;

– при шероховатых стенках

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = 8,5 + \kappa^{-1} \left(\ln \frac{y}{\Delta} - \frac{y - \Delta}{L} \right), \quad \text{при } \Delta \leq y \leq A \cdot L; \quad (10)$$

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = 8,5 + \kappa^{-1} \left(\ln \frac{AL}{\Delta} - A + \frac{\Delta}{L} \right) + \frac{\kappa^{-1}}{A} \left[\frac{y}{L} \left(1 - 0,5 \frac{y}{L} \right) - A + \frac{A^2}{2} \right], \quad \text{при } y > A \cdot L; \quad (11)$$

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = 8,5 + \frac{\kappa^{-1}}{A} \left[\frac{y}{L} \left(1 - 0,5 \frac{y}{L} \right) - A + \frac{A^2}{2} \right], \quad \text{при } \Delta = A \cdot L, \quad \text{где } 8,5 = \frac{u_{ct}}{u_*}.$$

В приведенных формулах у единообразно отсчитывается внутрь потока от стенки, как это было введено И. Никурадзе и Л. Прандтлем. Пределы интегрирования основного уравнения равномерного движения принимались от 0 до y – при гладких и от Δ до y – при шероховатых стенках.

Широкая проверка на соответствие опытным данным [6] позволяет заключить, что предложенная модель турбулентного потока является пригодной при расчете распределения осредненных скоростей по сечению трубопровода от стенки до его оси при точном удовлетворении следующему набору условий:

1. Выполняются условия прилипания и равенства градиента скорости нулю на оси потока при гладких стенках.

2. Выполняется условие удовлетворения «второй константе турбулентности» и нулевому градиенту скоростей на оси потока при шероховатых стенках.

3. Выполняется условие равенства при $Re_d > 10^4$ дефицита средней скорости $D_V = 4,0$.

4. Соблюдено постоянство константы Кармана $\kappa = 0,4$.

5. Расчетное значение коэффициента гидравлического трения λ соответствует значениям, полученным по формуле Кольброка – Уайта, а для гладких стенок – Блазиуса и Никурадзе.

6. Изменение числа Рейнольдса от малых (порядка 3000) до весьма больших значений приводит к перестройке внутренней структуры турбулентного потока. Если в указанном диапазоне рассмотреть их соотношение при увеличении числа Рейнольдса, то толщина пристенного слоя уменьшается от $\delta_{ct} = r_0$ до Δ , после чего он разрушается, что характеризует наступление квадратичной зоны сопротивления.

7. В пределах $3000 < Re_d < 10^4$ слой с логарифмическим распределением скоростей отсутствует, а поток делится на ядро с параболическим распределением скоростей и пристенный слой.

8. При $Re_d \approx 10^4$ возникает слой с логарифмическим распределением скоростей, а толщина пристенного слоя начинает быстро уменьшаться ($\delta_{ct} < A r_0$) при одновременном уменьшении параметра A .

9. Этот процесс продолжается до достижения некоторого значения числа Re_d , зависящего от относительной шероховатости, при котором A принимает постоянное значение: $A = 0,1735$.

10. При уменьшении δ_{ct} до Δ турбулентный поток оказывается состоящим всего из двух зон – с логарифмическим и параболическим распределением скоростей, что соответствует переходу к квадратичной зоне сопротивления.

11. Формула для распределения осредненных скоростей по сечению трубопровода имеет единую форму для всех зон сопротивления, содержит три параметра δ_{ct} , a и A .

12. Для определения всех перечисленных ранее параметров турбулентного потока, включая и распределение осредненных скоростей, по алгоритму и программе, составленной авторами, требуется ввод исходных данных в следующем (или эквивалентном ему) наборе:

– расход Q ;

– диаметр трубопровода;

- кинематический коэффициент вязкости v ;
- эквивалентная шероховатость Δ .

13. Отметим, что при достижении квадратичной зоны сопротивления в формулах для распределения осредненных скоростей, δ_{cr} естественным образом заменяется высотой выступа шероховатости Δ , так как на границе зон сопротивлений $\delta_{cr} \equiv \Delta$. Этот факт подтверждает универсальность предложенных формул.

Изложенное позволяет заключить, что цитата А.Д. Альтшуля, приведенная в начале статьи, устарела, а ожидаемый метод расчета предложен и обоснован в [1].

Рискнем предположить, что это обстоятельство может служить основанием для замены физических экспериментов по выявлению зависимости различных турбулентных величин от глобальных параметров вычислительным экспериментом. Это резко снижает стоимость исследований и повышает точность получаемых результатов, особенно на весьма малых расстояниях от стенки, где это пока физически недоступно.

Выводы. 1. Обнаружение необходимых в научных или прикладных целях тех или иных соотношений между параметрами турбулентных потоков является трудоемкой и достаточно дорогой процедурой. Часто при современном развитии измерительной техники она вообще не может быть реализована. К числу подобных случаев относится, например, измерение скоростей на сверхмалых расстояниях от стенки.

2. Предлагается заменить поиск нужных соотношений с помощью физических экспериментов переходом на использование вычислительных экспериментов.

3. Необходимым условием для реализации этой идеи является наличие надежного аналитического выражения, описывающего искомые взаимосвязи. Во второй и третьей частях статьи будут приведены примеры получения соответствующих результатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. М.: Недра, 1970. 216 с.
2. Prandtl L. Neuere Ergebnisse der Turbulenzforschung // V.D.I. 1933. B. 77. No. 5. S. 107–110.
3. Высоцкий Л.И., Высоцкий И.С. Продольно-однородные осредненные турбулентные потоки. Саратов: СГТУ, 2011. 560 с.
4. Высоцкий Л.И. К вопросу об автомодельности течений в продольно-однородных турбулентных потоках // Научн. журн. Рос. НИИ проблем мелиорации. 2013. № 2(10). С. 130–156.
5. Karmann T.Y. Mechanical similarity and turbulence (in German). // Nachrichten von der Gesellschaften der Wissenschaften zu Göttingen Mathematisch Physikalische Klasse. 1930. S. 56–76.
6. Osterlund J. Stockholm, 1999. <http://www.mech.kth.se/~jens/zpg/>.

Высоцкий Лев Ильич, д-р техн. наук, проф.

Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина

Получено после доработки 09.12.15

Vysotskiy Lev Il'ich, DSc, Professor
Saratov State Technical University, Russia

**EFFICIENT USE A NEW MODEL OF TURBULENT STRUCTURE
OF A LONGITUDINALLY-UNIFORM FLOW WHEN
ANALYZING THEIR PARAMETERS**

P a r t I

Considers some problems of defining the most important parameters of the turbulent longitudinally-uniform flow using a new analytical dependence, past extensive security checks in a wide range of values of Reynolds number and relative roughness. Substantiates the advantage of this method.

K e y w o r d s: the formula Colebrook, the formula of Prandtl, the Reynolds number, the velocity deficit, a new model for the structure of turbulent flow.

REFERENCES

1. A1'tshul' A.D. Gidravlicheskie soprotivleniya [Hydraulic resistance]. Moscow, Nedra, 1970. 216 p. (in Russia)
 2. Prandtl L. Neuere Ergebnisse der Turbulenzforschung. V.D.I. 1933. B. 77. No. 5. S. 107–110.
 3. Vysotskiy L.I., Vysotskiy I.S. Prodol'no-odnorodnye osrednennye turbulentye potoki [Longitudinally-averaged homogeneous turbulent flows]. Saratov, SSTU, 2011. 560 p. (in Russia)
 4. Vysotskiy L.I. K voprosu ob avtomodel'nosti techeniy v prodol'no-odnorodnykh turbulentnykh potokakh [To a question of self-similarity of currents in longitudinally uniform turbulent streams]. Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii [Scientific magazine of the Russian scientific research institute of problems of melioration]. 2013. No. 2 (10). Pp. 130–156. (in Russia)
 5. K a r m a n T.Y. Mechanical similarity and turbulence (in German). Nachrichten von der Gesellschaften der Wissenschaften zu Göttingen Mathematisch Physikalische Klasse. 1930. S. 56–76.
 6. O s t e r l u n d J. Stockholm, 1999. <http://www.mech.kth.se/~jens/zpg/>.
-

УДК 691.328.4 : 620.179.14

Е.П. МАТУС, В.А. ДОРФ, Р.О. КРАСНОВСКИЙ, Д.Е. КАПУСТИН

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЛОКОН ФИБРЫ В ТОНКОСТЕННЫХ СТАЛЕФИБРОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Предлагается способ контроля распределения волокон стальной фибры в тонкостенных конструкциях из сталефибробетона. Испытания проведены на фрагментах листов несъемной опалубки толщиной от 20 до 30 мм. Способ основан на измерении электромагнитных свойств сталефибробетона с помощью дифференциального трансформатора, работающего на частоте переменного тока 70 кГц. Получены калибровочные зависимости показаний прибора от параметров армирования для фибр диаметром от 0,15 до 0,8 мм и длиной от 30 до 50 мм различного профиля. Разработанный способ контроля позволяет определять расход стальной фибры от 20 до 500 кг/м³ и контролировать неравномерность распределения фибр по толщине конструкции.

Ключевые слова: сталефибробетон, неразрушающий контроль, тонкостенные конструкции.

При возведении объектов повышенного уровня ответственности (атомные электростанции, мосты и др.) применяют несъемную несущую и самонесущую железобетонную опалубку. Это позволяет повысить технологичность процесса строительства и прочностные характеристики с одновременным сокращением материоемкости сечения несущих элементов.

Недостатками применения железобетонной опалубки являются значительный вес, недостаточная пожаростойкость, необходимость в ряде случаев применения предварительно напряженной арматуры. Материалом, обладающим достаточными прочностными, деформационными и эксплуатационными характеристиками для изготовления несъемной опалубки, является фибробетон [1–3].

При правильном подборе состава на цементе M500 и кварцевом песке с добавлением микрокремнезема и суперпластификатора могут быть получены сталефибробетоны с достаточно высокими физико-механическими показателями: прочность на сжатие до 120 МПа, растяжение при изгибе до 30 МПа, модуль упругости до 60 ГПа, морозостойкость F1000 и выше, водопроницаемость В20, ударная вязкость до 68 кДж/м². В качестве несъемной опалубки в армоблоках наиболее эффективно применять сталефибробетонные листы толщиной 20–30 мм, обеспечивающие требуемую прочность [4, 5].

Листы опалубки изготавливают по стандартной для бетонных и железобетонных изделий технологии на основе цементно-песчаной матрицы с вводимыми в нее при перемешивании волокнами стальной фибры. Укладка самоуплотняющейся сталефибробетонной смеси на поддон из ламинированной фанеры позволяет получать гладкую лицевую поверхность (рис. 1).

При изготовлении такой опалубки необходимо проводить контроль равномерности распределения фибр в изделии. Неразрушающий контроль можно осуществить, используя магнитные свойства сталефибробетона [6–8].

Ранее нами была получена простая реализация способа такого контроля, основанного на измерении параметров переменного тока через тонкую катушку индуктивности, настроенную в резонанс с генератором и последовательно включенной емкостью в отсутствие сталефибробетона вблизи поверхности катушки [9]. При наложении катушки на поверхность сталефибробетона значение силы тока меняется в зависимости от параметров армирования.

При использовании данного способа были выявлены недостатки: низкая чувствительность при коэффициенте армирования менее 1 % по объему, нестабильность работы в области резонанса из-за случайных факторов.

Улучшить чувствительность и стабильность воспроизведения результатов контроля можно с помощью дифференциальных методов, используя в качестве регистрирующих датчиков дифференциальный трансформатор.

На рис. 2, 3 представлена схема и внешний вид установки. Дифференциальный трансформатор состоит из двух одинаковых пар катушек (трансформаторов), первичные обмотки которых соединены последовательно, а вторичные навстречу друг другу. Обмотки находятся на одном немагнитном сердечнике диаметром 11 см. В каждой обмотке 50 витков медного провода диаметром 0,3 мм. Толщина обмоток не превышает 1 см. Расстояние между трансформаторами 45 см. В отсутствие образца ЭДС во вторичных обмотках компенсируются и вольтметр показывает минимальное напряжение. Когда регистрирующий трансформатор прикладывают к поверхности образца, происходит изменение взаимной индуктивности его обмоток и суммарное ЭДС уже не компенсируется. Рассогласование тем больше, чем большее количество стальных волокон находится в непосредственной близости от регистрирующих катушек.



Рис. 1. Готовый к транспортировке и монтажу армоблок внутренней стены с дверным проемом и проходками для кабелей и трубопроводов

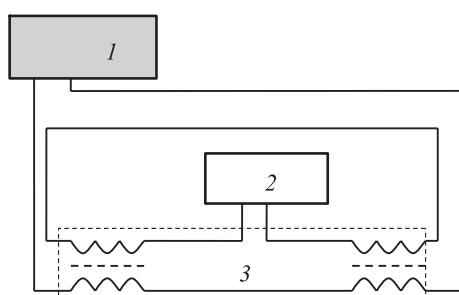


Рис. 2. Схема установки
1 – генератор Г3-123, 2 – вольтметр В7-38,
3 – датчик

форматор прикладывают вплотную к поверхности образца, происходит изменение взаимной индуктивности его обмоток и суммарное ЭДС уже не компенсируется. Рассогласование тем больше, чем большее количество стальных волокон находится в непосредственной близости от регистрирующих катушек.



Рис. 3. Внешний вид установки

Измерения проводились на экспериментально подобранный по максимальной чувствительности частоте 70 кГц. Напряжение на вольтметре в отсутствие образца 10 мВ. Размеры образцов $200 \times 200 \times 30$ мм. Датчик устанавливался в середину образца с одной и другой стороны последовательно.

Использовались следующие виды стальных фибр из проволоки: ФСП-А $0,3 \times 30$ (анкерная, диаметром 0,3 мм и длиной 30 мм), ФСП $0,8 \times 30$ (без анкеров, диаметром 0,8 мм и длиной 30 мм), ФСП-В $0,3 \times 15$ («волновая», диаметром 0,3 мм и длиной 15 мм), ФСП-А $0,8 \times 50$ (анкерная, диаметром 0,8 мм и длиной 50 мм). Коэффициент армирования образцов изменялся в диапазоне от 0,5 до 6 % от объема. С каждым видом фибр и коэффициентом армирования изготавливались по три образца.

На рис. 4, 5 показаны зависимости показаний вольтметра, усредненных по каждой серии измерений с обеих сторон образца, от коэффициента армирования (для фибр ФСП-А $0,3 \times 30$ и ФСП-А $0,8 \times 50$ было затруднительно

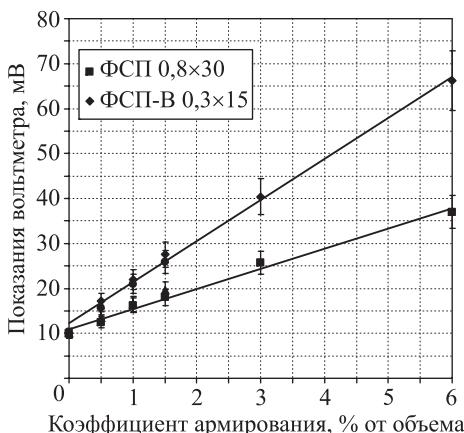


Рис. 4. Зависимости показаний вольтметра от коэффициента армирования фибрами ФСП-В $0,3 \times 15$ и ФСП-А $0,8 \times 30$

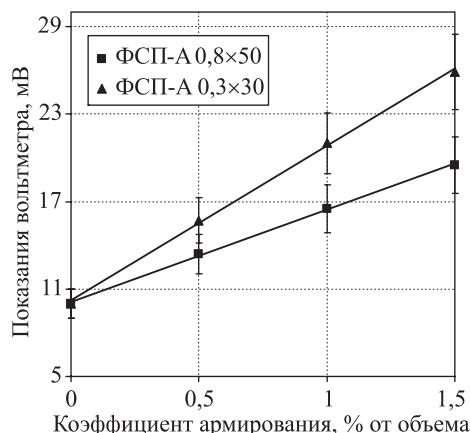


Рис. 5. Зависимости показаний вольтметра от коэффициента армирования фибрами ФСП-А $0,3 \times 30$ и ФСП-А $0,8 \times 50$

но изготовить образцы без «ежей» с коэффициентом армирования более 1,5 %).

Полученные калибровочные зависимости в высокой степени (достоверность аппроксимации $R^2 > 0,99$) линейны. Коэффициент пропорциональности растет с уменьшением диаметра фибр и незначительно зависит от их длины.

Проведена диагностика распределения фибр в фрагментах несъемной опалубки. Габариты фрагмента с фиброй ФСП-В 0,3×15: 1500×500×30 мм. Измерения показаний вольтметра проведены с двух сторон плиты в 12 точках, равномерно распределенных по поверхности образца. Установлено, что коэффициент армирования в армоблоках составляет $3,0 \pm 0,3$ %. В верхней части (плиты формировались горизонтально) – 2,7 %, в нижней – 3,2 % (средние значения). Таким образом, технология формования армоблоков обеспечивает допустимую равномерность распределения волокон фибры как в плоскости плиты, так и по ее высоте.

Другой важной характеристикой распределения фибр является их коэффициент ориентации вдоль определенного направления. Была опробована методика определения ориентации с помощью датчика П-образной формы, используемого в измерителях защитного слоя арматуры в бетоне. Датчик устанавливался в середину образца вдоль направления укладки смеси и в перпендикулярном направлении.

Данная методика показала незначительную чувствительность к ориентации фибр. Ориентацию фибр удалось определить только помещая вырезанные из плит образцы внутрь длинной электромагнитной катушки (рис. 6).

Методика измерений следующая: образцы помещаются в середину измерительной катушки и определяется изменение показаний вольтметра. По-перечный размер образцов не более 100 мм. Эксперимент проводят в трех взаимно перпендикулярных направлениях.

В первом приближении связь показаний U вольтметра с коэффициентом армирования μ и коэффициентом ориентации k имеет вид

$$U = \frac{U_0}{1 + \frac{\mu k}{c}}, \quad (1)$$

где U_0 – показания вольтметра в отсутствие образца, c – численный коэффициент, зависящий от параметров установки, размеров образца и используемого вида фибр.

Частота генератора подбирается как резонансная для используемой установки (максимальное значение напряжения без образца было 135 мВ). Данные эксперимента приведены в таблице.

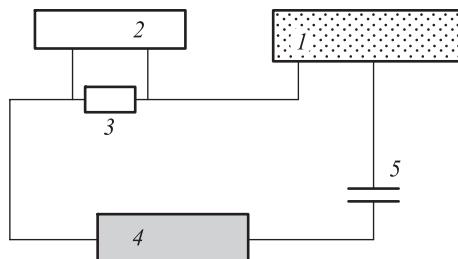


Рис. 6. Схема установки по определению коэффициента ориентации

1 – генератор ГЗ-123 с частотой 20,2 кГц и выходным напряжением 1 В, 2 – вольтметр В7-38, 3 – сопротивление 1 Ом, 4 – катушка с образцом (200 витков проволоки диаметром 1 мм), 5 – конденсатор электроемкостью 0,025 МкФ

Результаты определения коэффициента ориентации

Тип фибр; процент армирования	Напряжение, мВ			Среднее отношение коэффициентов ориентации
	ось катушки вдоль укладки	ось катушки поперек укладки	ось катушки перпендикулярна плоскости образца	
ФСП-В 0,3×15; 1,5 %	95±3	105±9	132±1	1,47
ФСП 0,8×30; 1,5 %	92±8	101±2	127±1	1,39
ФСП-А 0,3×30; 1 %	111±7	116±6	133±1	1,31
ФСП-А 0,8×50; 1,5 %	111±6	110±6	133±1	0,95

Выявлено, что ориентация фибр носит плоскостной характер с преимущественной ориентацией фибр вдоль направления укладки смеси (что было подтверждено визуальным осмотром мест распила образцов).

На основе изложенной методики разработан прототип прибора контроля качества тонкостенной сталефибробетонной опалубки. Данная разработка позволяет контролировать равномерность распределения фибр в изделиях из сталефибробетона толщиной от 20 до 30 мм. Минимально фиксируемый расход фибры при ее равномерном распределении в затвердевшем изделии составляет 20 кг/м³, максимальный – 500 кг/м³.

Число и расположение контролируемых участков конструкции назначают в зависимости от цели и условий испытаний, особенностей проектного решения конструкции, технологии изготовления или возведения конструкции. На поверхности конструкции в местах измерений не должно быть наплывов высотой более 2 мм. Линейные размеры измеряемого плоского участка должны быть не менее полутора диаметров датчика.

Градуировочную зависимость устанавливают для конкретной конструкции, используя ее фрагмент или специально изготовленные образцы. Измерения выполняют в практически необходимом диапазоне коэффициента армирования. Металлические детали должны быть расположены на расстоянии, исключающем их влияние на показания приборов (достаточно 10 см от проводов и 20 см от катушек). Для установления градуировочной зависимости измерения необходимо провести не менее четырех раз (два образца с двух сторон).

Предлагаемый способ позволяет установить коэффициент армирования в области непосредственно под датчиком при равномерном распределении известного вида фибр для их хаотичной и плоскостной ориентации (что обычно реализуется при укладке фибр в формы небольшой толщины).

На измерения влияет распределение фибр по высоте образца. Возможно оценить расслоение фибр по разности показаний при измерении сверху и снизу образца, но точный вид этого распределения с помощью описываемого способа не определяется.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Калашников В.И., Скачков Ю.П., Ананьев С.В., Троянов И.Ю. Геометрические параметры фибры для высокопрочных бетонов // Региональная архитектура и строительство. 2011. № 1. С. 27–33.
- Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. М.: Изд-во АСВ, 2011. 642 с.

3. Калашников В.И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // Строительные материалы. 2008. № 10. С. 2–6.
4. Дорф В.А., Красновский Р.О. Перспективы возведения зданий и сооружений АЭС из армоблоков с несъемной сталефибробетонной опалубкой // Атомное строительство. 2013. № 15. С. 21–27.
5. Туголуков А.М., Рабинович Ф.Н., Фролов Ю.В. Совершенствование несъемной опалубки для монолитных конструкций // Промышленное строительство. 1983. № 11. С. 17–21.
6. Cavalaro S.H.P., Lopez R., Torrents J.M., Aguado A. Improved assessment of fibre content and orientation with inductive method in SFRC // Materials and Structures. 2015. No. 48. Pp. 1859–1873.
7. Матус Е.П., Безбородов В.Г. Метод определения степени ориентации фибр в изделиях из сталефибробетона // Изв. вузов. Строительство. 2000. № 1. С. 118–120.
8. Roussel N., Laetitia M., Franc J. Fiber orientation during casting of UHPFRC: electrical resistivity measurements, image analysis and numerical simulations // Materials and Structures. 2015. No. 48. Pp. 947–957.
9. Матус Е.П. Неразрушающий контроль распределения фибр в сталефибробетоне // Изв. вузов. Строительство. 2007. № 3. С. 110–113.

Матус Евгений Петрович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: matus_evg@mail.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Дорф Валерий Анатольевич, канд. техн. наук; E-mail: dorfva@ioes.ru
ЗАО «Оргэнергострой», г. Москва

Красновский Ростислав Олегович, канд. техн. наук
ЗАО «Оргэнергострой», г. Москва

Капустин Дмитрий Егорович, инж.
ЗАО «Оргэнергострой», г. Москва

Получено после доработки 19.12.15

Matus Eugeniy Petrovich, PhD, Ass. Professor; E-mail: matus_evg@mail.ru
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Dorf Valeriy Anatol'evich, PhD; E-mail: dorfva@ioes.ru
Orgenergostroy inc., Moscow, Russia

Krasnovskiy Rostislav Olegovich, PhD
Orgenergostroy inc., Moscow, Russia
Kapustin Dmitriy Egorovich, Engineer
Orgenergostroy inc., Moscow, Russia

NONDESTRUCTIVE CONTROL OF FIBERS DISTRIBUTION IN STEEL FIBER CONCRETE THIN SLAB STRUCTURES

The method of the control device prototype of the fiber distribution in thin steel fiber reinforced concrete slab structures are presents. Tests carried out on fragments of sheets permanent formwork with a thickness of 20 to 30 mm. The method is based on measuring the electromagnetic properties of concrete with the help of differential transformer operating at the frequency of the alternating current 70 kHz. The obtained calibration dependences of readings of reinforcement parameters for fibers with a diameter of from 0,15 to 0,8 mm and lengths from 30 to 50 mm in various profile. It is shown that the proposed method allows to determine the content of steel fibers is from 20 to 500 kg/m³ and the unevenness of fiber distribution across the thickness of the structures.

К e y w o r d s: steel fiber reinforced concrete, nondestructive control, thin slab structure.

REFERENCES

1. Kalashnikov V.I., Sachkov Yu.P., Anan'ev S.V., Troyanov I.Yu. Geometricheskie parametry fibry dlya vysokoprochnykh betonov [The geometrical parameters of the fiber for high-strength concrete]. Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo [Regional Architecture and Engineering]. 2011. No. 1. Pp. 27–33. (in Russia)
 2. Rabinovich F.N. Kompozity na osnove dispersno armirovannykh betonov [Composites based on dispersion reinforced concrete]. Moscow, Publisher CRS, 2011. 642 p. (in Russia)
 3. Kalashnikov V.I. Raschet sostavov vysokoprochnykh samouplotnyayushchikhsya betonov [Calculation of the composition of high-strength self-compacting concrete]. Stroitel'nye materialy [Building Materials]. 2008. No. 10. Pp. 2–6. (in Russia)
 4. Dorf V.A., Krasnovskiy R.O. Perspektivy vozvedeniya zdaniy i sooruzheniy AES iz armoblokov s nes'emonoy stalefibrobetonnoy opalubkoy [Prospects for the construction of buildings and structures of nuclear power plants with blocks with permanent fiber reinforced concrete formwork]. Atomnoe stroitel'stvo [Nuclear construction]. 2013. No. 15. Pp. 21–27. (in Russia)
 5. Tugolukov A.M., Rabinovich F.N., Frolov Yu.V. Sovershenstvovanie nes'emonoy opalubki dlya monolitnykh konstruktsiy [Improving permanent formwork for monolithic structures]. Promyshlennoe stroitel'stvo [Industrial Construction]. 1983. No. 11. Pp. 17–21. (in Russia)
 6. Cavalaro S.H.P., Lopez R., Torrents J.M., Aguado A. Improved assessment of fibre content and orientation with inductive method in SFRC. Materials and Structures. 2015. No. 48. Pp. 1859–1873.
 7. Matus E.P., Bezborodov V.G. Metod opredeleniya stepeni orientatsii fibr v izdeliyakh iz stalefibrobetona [The method of determining the degree of fibers orientation in steel fiber reinforced concrete products]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2000. No. 1. Pp. 118–120. (in Russia)
 8. Roussel N., Laetitia M., Franc J. Fiber orientation during casting of UHPFRC: electrical resistivity measurements, image analysis and numerical simulations. Materials and Structures. 2015. No. 48. Pp. 947–957.
 9. Matus E.P. Nerazrushayushchiy control' raspredeleniya fibr v stalefibrobetone [Nondestructive control of fibres distribution in steel fiberconcrete]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2007. No. 3. Pp. 110–113. (in Russia)
-

В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

УДК 620.194.8

Г.Ф. РУДЗЕЙ, Л.А. АДЕГОВА, В.В. ДУБИНИН

РАСЧЕТ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОБРАЗЦОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ДЕЙСТВИИ КОРРОЗИОННОЙ СРЕДЫ

Представлены результаты комплексного экспериментального исследования влияния типовых коррозионных воздействий и технологических видов обработки поверхности (анодирование, упрочнение) на усталостную долговечность конструктивных образцов из листового полуфабриката сплава 1163 (плакированный лист толщиной 2 мм) при статической силовой нагруженности в процессе экспозиций. Конечно-элементным анализом проведен расчет усталостной долговечности образцов с отверстием при моделировании программы испытаний строительной конструкции. Показано значительное влияние коррозионных повреждений на ресурсные характеристики конструктивного элемента.

Ключевые слова: усталостная долговечность, кривые усталости, коррозионная среда, анализ напряженно-деформированного состояния.

Алюминиевые сплавы, широко применяемые в строительных конструкциях, в процессе эксплуатации подвергаются воздействию различных агрессивных сред. Совместное действие нагрузки и среды эксплуатации вызывает появление в конструктивных элементах коррозионных повреждений, которые существенно снижают ресурсные характеристики. Поэтому задача исследования усталостной долговечности конструктивных элементов при предварительном действии коррозии под напряжением является актуальной. Сравнительная оценка влияния состояния поверхности на коррозионную стойкость (по критерию остаточной усталостной долговечности) листового полуфабриката сплава 1163 проведена для следующих вариантов поверхностной обработки заготовок, выполненных по штатной технологии:

- «А»: исходное состояние полуфабриката (плакировка с двух сторон, номинальная толщина листа $1,82 \pm 0,1$ мм);
- «Б»: плакировка листа + анодирование с двух сторон (анодирование исходного листа с двух сторон по ПИ 265–72 ВИАМ, толщина анодной пленки 8 мкм);
- «В»: полное стравливание плакирующего слоя + упрочнение поверхности с двух сторон по режиму: дробь стальная диаметром 1,0 мм, $P_{раб} = 1$ атм, насыщение поверхности 90–95 %. Конечная толщина заготовки $1,54 \pm 0,2$ мм;
- «Г»: полное стравливание плакирующего слоя + упрочнение поверхности + анодирование с двух сторон.

Исследование усталостной долговечности проведено на плоских образцах (вырезка из соответствующих заготовок вдоль проката полуфабриката) шириной в рабочей части 24 мм с концентратором напряжения в виде центрального отверстия \varnothing 4 мм (теоретическим коэффициентом концентрации напряжений $k_t = 2,6$). Во всех случаях концентратор наносился после обработки поверхности. В качестве коррозионных сред в работе использовали 3%-й раствор хлористого натрия (далее 3%-й NaCl – стандартная среда для подобного рода исследований). Среда сравнения – воздух лабораторного помещения.

Основной объем сравнительных усталостных испытаний образцов с технологической и коррозионной предысториями проведен асимметричным циклом растяжения, близким к отнулевому ($\sigma_{\min} = 20$ МПа) при $\sigma_{\max} = 160$ МПа (частота ~ 40 Гц). Здесь и далее все уровни напряжений даны по нетто-сечению (с учетом уменьшения площади поперечного сечения образца за счет отверстия). В качестве критерия количественной оценки влияния коррозионных воздействий принята долговечность образцов до разрушения. Испытания при исследовании коррозии под напряжением чаще всего выполняются на одном уровне циклического нагружения из-за трудоемкости и длительности эксперимента. Предварительные выдержки образцов в жидкой среде осуществляли в условиях полного погружения без нагрузки и под постоянным статическим напряжением (осевое растяжение) $\sigma_{\text{ст}} = 80$ МПа. Длительность экспозиций $\tau = 3000$ ч (125 сут). В каждом случае испытано не менее 5 образцов на точку.

Для расчета ресурса элементов конструкций нужны базовые кривые усталости, полученные с учетом конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов. Поэтому злободневным является расчетное прогнозирование кривых усталости по результатам уже выполненного ограниченного объема испытаний. На основании статистического анализа большого числа экспериментальных данных установлена взаимосвязь между параметрами уравнений регрессии функций $\lg N_i = f(\lg \sigma_i)$ при отнулевом цикле нагружения [1, 2]. Экспериментально установлено, что в некотором диапазоне долговечностей (\approx при $2 \cdot 10^4 \leq N \leq 5 \cdot 10^6$ циклов) многие кривые усталости линейны. При расчете усталостной долговечности все циклы нагружения приводятся к отнулевым. В этом случае в двойных логарифмических координатах при отнулевом нагружении имеем уравнение базовой кривой усталости образцов (уравнение регрессии)

$$\lg N_i = a + b \cdot \lg \sigma_{\max i}. \quad (1)$$

Здесь $\sigma_{\max i}$ – максимальное напряжение цикла нагружения;

N_i – число циклов до разрушения на заданном уровне напряжения;

a и b – коэффициенты уравнения регрессии, которые определяются экспериментально на основании результатов усталостного эксперимента и формул линейного регрессионного анализа.

При нагружении с переменными значениями среднего (σ_m) и амплитудного (σ_a) напряжений цикла при $\sigma_m = \text{const}$ уравнение имеет вид

$$\lg N_i = a + b \cdot \lg \sigma_{ai}. \quad (2)$$

С помощью линейного регрессионного анализа [3] определяются коэффициенты a и b уравнения регрессии:

$$y = a + b \times x. \quad (3)$$

Установлено, что для различных сплавов и типов образцов взаимосвязь между коэффициентами уравнений регрессии примерно постоянна, на основании чего при отнулевом нагружении уравнение (1) может быть преобразовано:

$$\lg N_i = a + b \times \lg \sigma_{\max i} = a + (1,6334 - 0,4047a) \times \lg \sigma_{\max i}. \quad (4)$$

Следовательно, выполнив усталостные испытания на одном уровне максимального напряжения цикла и получив значение долговечности, можно определить коэффициент a , затем вычислить коэффициент b и записать уравнение регрессии для исследуемого случая. Далее рассчитывается кривая усталости.

Вычисленные коэффициенты уравнений регрессии, экспериментальные и расчетные значения усталостной долговечности образцов с различными видами обработки поверхности при действии коррозионной среды приведены в таблице.

Для оценки ресурсных характеристик образца с отверстием после коррозионной предыстории при программном нагружении используется следующее соотношение традиционной методики [4–6]:

$$N_p = \frac{A_{\text{бр}}}{\sigma_{0 \max}^m} \times k_{tg}^m. \quad (5)$$

Здесь m и $A_{\text{бр}}$ – параметры кривой усталости, зависящие от свойств материала и конструктивно-технологических особенностей конструкции; $k_{tg} = 3,02$ – коэффициент концентрации напряжений (при расчете по сечению брутто);

$\sigma_{0 \max}$ – максимальное значение одного отнулевого цикла, эквивалентного по вносимому усталостному повреждению всему блоку нагружения.

Блок программы нагружения строительной конструкции включал три ступени: 150, 130 и 110 МПа. Самая высокая единичная нагрузка блока нагружения ($\sigma_{\max} = 150$ МПа) повторялась через каждые 120 000 циклов, включающих 20 000 циклов $\sigma_{\max} = 130$ МПа и 100 000 циклов $\sigma_{\max} = 110$ МПа (рис. 1). Блок программы нагружения повторялся до разрушения образцов.

Для образца с центральным отверстием $d = 2$ мм (рис. 2) была разработана конечно-элементная модель (рис. 3).

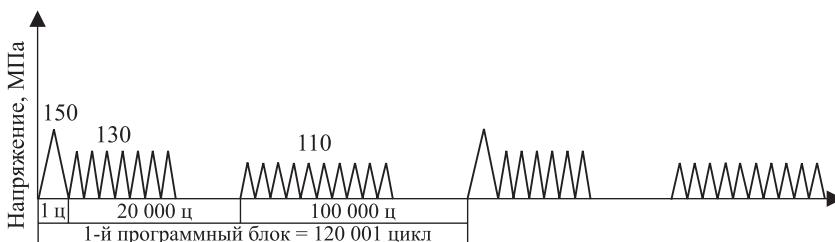


Рис. 1. Программный блок нагружения

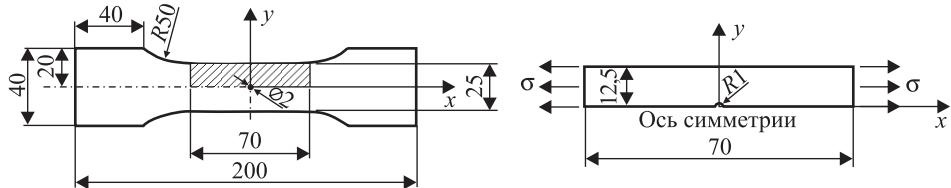


Рис. 2. Образец с отверстием и расчетная схема

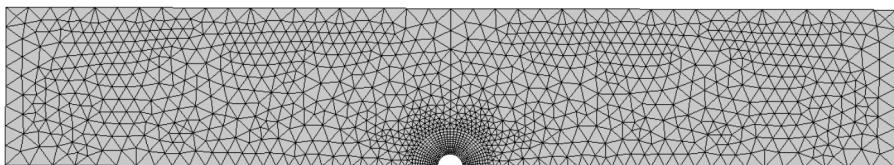


Рис. 3. Конечно-элементная модель образца

Чтобы избежать влияния переходных зон на результаты исследования, в расчетную схему включена только регулярная зона образца. Анализ проводился для половины образца с наложением условий симметрии для перемещений узлов, лежащих на плоскости симметрии. Для моделирования образца использовались двумерные элементы типа *PLATE*, в общем случае учитывающие мембранные, сдвиговые, поперечные и изгибающие внутренние силовые факторы.

Расчетная оценка долговечности при программном нагружении проведена на основании формулы (5) и представлена в таблице.

Из таблицы следует, что испытания в агрессивной среде приводят к более значительному повреждению поверхностей образцов, чем предварительная выдержка в агрессивной среде длительностью 125 сут (для случая «А» снижение долговечности соответственно – в 4,1 и \approx в 3 раза). При длительности экспозиции в агрессивной среде 125 сут более опасным является развитие коррозии под напряжением. По сравнению с вариантом выдержки в среде без воздействия статической нагрузки отмечено снижение долговечности для вариантов «В» и «Г» в 2,5 и 1,5 раза соответственно.

У образцов в исходном состоянии наибольшее снижение долговечности отмечено для случая обработки поверхности «Г» (в 2,9 раза по сравнению с вариантом «А»). При нанесении дополнительного защитного слоя (плакировка листа + анодирование с двух сторон) усталостная долговечность из-за увеличения толщины более слабого, чем основной материал, покрытия снизилась в 2,2 раза. Однако после экспозиции в среде 3%-го NaCl 125 сут при воздействии статической нагрузки 80 МПа наибольшее значение долговечности получено для случая обработки поверхности «Б». Плакировка листа + анодирование с двух сторон способствовали более надежной защите поверхностей от коррозионных поражений, чем другие случаи их обработки.

Полученные результаты могут быть использованы при выборе вариантов технологической обработки поверхностей, при оценке ресурса изделий.

Уравнения кривых усталости и усталостная долговечность образцов

Коррозионная предыстория		Коэффициенты уравнений регрессии		Экспериментальные (*) и расчетные значения долговечности N_p , цикл при уровнях σ_{max} , МПа		Уравнения кривой усталости		Расчетные значения долговечности при программном напряжении N_p , цикл
среда, выдержка t , сут	σ_{cr} , МПа	a	b	200	160 (*)	140		
<i>Плакировка листа с двух сторон, «А»</i>								
0 (исходные)	0	19,2136	-6,1976	89700	357600	818101	$N\sigma_{\text{op}}^{6,20} = 5,3308 \times 10^8$	1150401
0 (испытание в 3%-м NaCl)	0	14,3977	-4,2231	47898	122907	216013	$N\sigma_{\text{op}}^{4,22} = 1,1383 \times 10^4$	278635
Экспозиция в среде 3%-го NaCl $\tau = 125$	0	15,5126	-4,6802	55385	157380	294009	$N\sigma_{\text{op}}^{4,68} = 1,3831 \times 10^5$	387739
<i>Плакировка листа + анодирование с двух сторон, «Б»</i>								
0 (исходные)	0	16,4812	-5,0773	62834	195090	384305	$N\sigma_{\text{op}}^{5,08} = 1,2130 \times 10^6$	516178
Экспозиция в среде 3%-го NaCl $\tau = 125$	80	16,3125	-5,0081	61469	187930	366799	$N\sigma_{\text{op}}^{5,00} = 7,9121 \times 10^5$	490896
<i>Плакировка листа спралена + дробоструйная обработка с двух сторон, «В»</i>								
0 (исходные)	0	17,3388	-5,4289	70262	235960	487161	$N\sigma_{\text{op}}^{5,43} = 8,1329 \times 10^6$	665517
Экспозиция в среде 3%-го NaCl $\tau = 125$	0	13,8806	-4,0110	44778	109590	187231	$N\sigma_{\text{op}}^{4,01} = 3,6319 \times 10^3$	238984
Экспозиция в среде 3%-го NaCl $\tau = 125$	80	10,8627	-2,7737	30222	56120	81278	$N\sigma_{\text{op}}^{2,77} = 4,3145 \times 10^0$	97011
<i>Плакировка листа спралена + дробоструйная обработка + анодирование с двух сторон, «Г»</i>								
0 (исходные)	0	15,5966	-4,7146	55995	160340	300920	$N\sigma_{\text{op}}^{4,71} = 1,6328 \times 10^5$	397410
Экспозиция в среде 3%-го NaCl $\tau = 125$	0	12,6556	-3,5088	38173	83520	133436	$N\sigma_{\text{op}}^{3,51} = 2,3968 \times 10^2$	165938
Экспозиция в среде 3%-го NaCl $\tau = 125$	80	11,2542	-2,9342	31803	61210	90570	$N\sigma_{\text{op}}^{2,93} = 1,0295 \times 10^1$	109086

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рудзей Г.Ф. Исследование механических характеристик материалов и конструктивных образцов из алюминиевых сплавов // Авиационная промышленность. 2010. № 2. С. 27–30.
2. Белов В.К. и др. Обеспечение усталостной долговечности авиационных конструкций технологическими методами. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. 404 с.
3. Степнов М.Н., Шарпин А.В. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник. М.: Машиностроение, 2005. 344 с.
4. Адегова Л.А. Применение модифицированных кривых усталости для расчетной оценки долговечности тонкостенных элементов конструкций // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 3. С. 92–98.
5. Стрижиус В.Е. Методы расчета усталостной долговечности авиационных конструкций: справочное пособие. М.: Машиностроение, 2012. 272 с.
6. Gorganson U.G., Hall J., McLain J.R., Watsonabe R.T. Long life damage tolerant jet transport structures. American society for testing and materials. Fatigue and fracture committees // Symposium on «Design of fatigue and fracture resistant structures». Bal Harbour, Florida. November 10–11, 1980.

Рудзей Галина Федоровна, д-р техн. наук, проф.; E-mail: galina_rudzey@mail.ru
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск
Адегова Людмила Алексеевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: adegova@mail.ru
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск
Дубинин Владимир Васильевич, начальник сектора; E-mail: dvv147@yandex.ru
ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина», г. Новосибирск

Получено 10.12.15

Rudzey Galina Fedorovna, DSc, Professor; E-mail: galina_rudzey@mail.ru
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Adegova Lyudmila Alexeevna, PhD, Ass. Professor; E-mail: adegova@mail.ru
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Dubinin Vladimir Vasil'evich, Chief of sector; E-mail: dvv147@yandex.ru
Siberian Aeronautical Research Institute named after S.A. Chaplygin, Novosibirsk, Russia

CALCULATION FATIGUE LIFE OF SAMPLES WITH DIFFERENT SURFACE TREATMENT UNDER THE EFFECT OF A CORROSIVE ENVIRONMENT

The paper presents results of a comprehensive pilot the Exploration of influence of typical corrosion and technological surface treatments (anodizing, hardening) on the fatigue life of the structural designs of semi-finished sheet alloy 1163 (Clad sheet 2 mm thick) with a static force loading during the exposures. Finite element analysis was conducted calculation of the fatigue life of samples with a hole in the simulation test program of the building structure. Significant influence of corrosion damage to the resource characteristics of the component.

Keywords: fatigue life, fatigue curves, the corrosive environment, analysis of stress-strain state.

REFERENCES

1. Rudzey G.F. Issledovanie mekhanicheskikh kharakteristik materialov i konstruktivnykh obraztsov iz alyuminievykh splavov [Investigation of mechanical

- properties of materials and design of aluminum alloy specimens]. Aviatsionnaya promyshlennost' [Aviation industry]. 2010. No. 2. Pp. 27–30 (in Russia)
2. Belov V.K. and others. Obespechenie ustalostnoy dolgovechnosti aviatsionnykh konstruktsiy tekhnologicheskimi metodami [Ensuring the fatigue life of the aircraft structures technologically-methods]. Novosibirsk: Publishing House of the NSTU, 2012. 404 p. (in Russia)
3. Stepnov M.N., Shavrin A.V. Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mekhanicheskikh ispytaniy: spravochnik [Statistical methods for processing the results of mechanical tests: Directory]. Moscow, Engineering, 2005. 344 p. (in Russssia)
4. Adygova L.A. Primenenie modifitsirovannykh krivykh ustalosti dlya raschetnoy otsenki dolgovechnosti tonkostennyykh elementov konstruktsiy [Application of the modified fatigue curve calculation for evaluating durability thin-walled elements]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No. 3. Pp. 92–98. (in Russia)
5. Strizhius V.E. Metody rascheta ustalostnoy dolgovechnosti aviatsionnykh konstruktsiy: spravochnoe posobie [Methods for calculating the fatigue life of aircraft structures]. Moscow, Engineering, 2012. 272 p. (in Russia)
6. Goranson U.G., Hall J., Maclin J.R., Watanabe R.T. Long life damage tolerant jet transport structures. American society for testing and materials. Fatigue and fracture committees. Symposium on «Design of fatigue and fracture resistant structures». Bal Harbour, Florida. November 10–11, 1980.
-

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕГАТИВНЫХ ФАКТОРОВ НА БЕЗАВАРИЙНУЮ ЭКСПЛУАТАЦИЮ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ (ГТС)

В НГАСУ (Сибстрин) сотрудниками кафедры гидротехнического строительства, безопасности и экологии реализована концепция многофакторного анализа состояния гидротехнических сооружений (ГТС), находящихся в длительной эксплуатации. Необходимость его проведения связана с установлением соответствия параметров ГТС нормам и правилам безопасности и рядом нормативно-правовых документов. В соответствии с нормативным документом СП 58.13330.2012 (п. 6.5) собственник ГТС или эксплуатирующая организация обязаны после 25 лет эксплуатации проводить комплексный анализ состояния объекта.

Для многофакторного анализа состояния ГТС был взят водохозяйственный объект, эксплуатируемый 46 лет, в том числе 20 лет после капитального ремонта, решены следующие задачи:

- уточнен состав диагностических показателей состояния ГТС;
- выполнены исследования по формированию ветровых воздействий по волноопасным направлениям с построением кривой обеспеченности ветра;
- выполнен комплекс расчетов по уточнению отметки гребня с учетом образования в водохранилище гравитационной волны при сейсмическом воздействии;
- проанализировано формирование фильтрационного режима грунтовой плотины в процессе эксплуатации;
- определены условия устойчивости грунтовой плотины с учетом результатов инженерно-геологических изысканий, выполненных на стадии разработки проекта реконструкции;
- выполнены поверочные расчеты водосбросных сооружений и уточнены сбросные расходы с учетом трансформации волны половодья;
- установлены условия безопасного сопряжения бьефов;
- уточнены критерии безопасности для всех сооружений, входящих в комплекс ГТС;
- установлено соответствие (несоответствие) параметров состояния ГТС критериям безопасности, требованиям технических регламентов в области проектирования и эксплуатации гидротехнических сооружений.

В результате выполненного многофакторного анализа этого объекта установлено:

- несоответствие конструкции грунтовой плотины современным требованиям нормативных документов (недостаточность превышения гребня плотины над максимальным уровнем воды в водохранилище (ФПУ), несовершенство конструкции плотины: недостаточность дренажных устройств в нижнем бьефе, отсутствие надежных мероприятий по сопряжению с берегами, расположение верха суглинистой маловодопроницаемой части плотины ниже отметки ФПУ, непроектное заложение низового откоса);

– формирование неблагоприятного фильтрационного режима грунтовой плотины (плотина практически обводнена, дренаж подтоплен, наблюдается заболоченность у подножия плотины, отсутствует дренаж в пойменной части и стокорегулирующие сооружения в береговых склонах);

– наличие и состав контрольно-измерительной аппаратуры (КИА) недостаточны для сооружений II класса;

– недостаточность запаса устойчивости низового откоса грунтовой плотины и необходимость уточнения физико-механических характеристик грунта основания;

– необходимость форсировки уровня в водохранилище выше проектного значения ФПУ для обеспечения пропуска расчетного расхода 0,1 % обеспеченности, что свидетельствует о недостаточности аккумулирующей способности водохранилища при существующем объеме водозабора.

На основании результатов выполненной работы сделан вывод о необходимости реконструкции ГТС гидроузла и даны рекомендации о составе работ по реконструкции его отдельных сооружений.

В НГАСУ (Сибстрин) могут выполнить многофакторный анализ любого объекта гидротехнического строительства, оценить его состояние и дать рекомендации по реконструкции его отдельных сооружений или узлов.

Разработчики: Лаврентьев Вадим Леонидович, канд техн. наук, проф.,

Дзюбенко Любовь Федоровна, канд. техн. наук, доц.,

Кузнецова Юлия Анатольевна, канд. техн. наук, доц.,

Соколова Валентина Андреевна, доц.

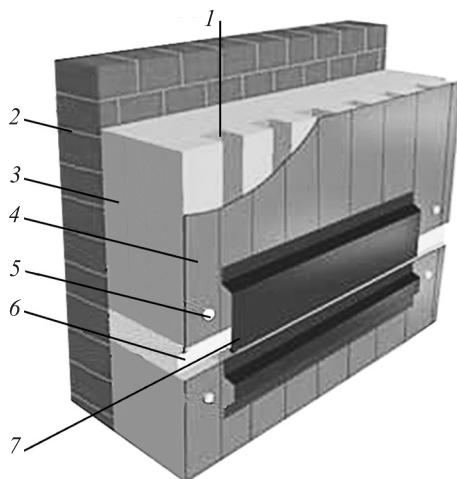
630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

E-mail: ngasu_gts@mail.ru

Тел./факс: + 7 (383) 266 94 11

НОВАЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННАЯ ФАСАДНАЯ СИСТЕМА ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ ПАНЕЛЕЙ С ВЕНТИЛИРУЕМЫМИ КАНАЛАМИ

Значительная часть существующих зданий имеет повышенный расход энергии на отопление по сравнению с нормативными требованиями. Для экономии тепловой энергии в новом строительстве и при реконструкции зданий широкое распространение получило утепление стен теплоизоляционными материалами в составе навесных фасадных систем с вентилируемым воздушным зазором – «вентилируемые фасады». Использование систем «вентилируемых фасадов» позволяет поддержать утеплитель в сухом состоянии. Однако для многих систем «вентилируемых фасадов» свойственна существенная теплотехническая неоднородность. Кроме того, большинство операций по установке этих систем выполняется непосредственно на строительной площадке, что осложняет контроль качества монтажных работ и увеличивает время их выполнения.



Фасадная система с вентилируемыми каналами

1 – вентилируемые каналы; 2 – несущая часть утепляемой стены; 3 – теплоизоляционная панель; 4 – металлическая облицовка панели; 5 – анкер крепления; 6 – горизонтальный вентилируемый стык; 7 – нащельник

В ООО «Термолэнд» при участии Института теплофизики СО РАН разработана инновационная технология системы утепления фасадов зданий. Основой новой фасадной системы является теплоизоляционная панель с вентилируемыми каналами (см. рисунок), которая изготавливается в заводских условиях на конвейерной линии. Опыт установки новой теплоизоляционной фасадной системы на ряде строящихся и реконструируемых зданий в г. Новосибирске показал высокую скорость и простоту монтажных работ, а тепловизионные обследования подтвердили высокие теплозащитные характеристики фасадной системы, которые удовлетворяют нормативным требованиям.

Разработчики:

Белый Владимир Тимофеевич, директор завода «Термолэнд», председатель правления ГК «Регион Трейд»;

Низовцев Михаил Иванович, д-р техн. наук, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск;

Стерляев Алексей Николаевич, канд. техн. наук, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск.

Электронный адрес для контакта: E-mail: office@thermoland.ru (завод «Термолэнд», группа компаний «Регион Трейд»)

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ, ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И РЕДАКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ РУКОПИСЕЙ СТАТЕЙ

1. Рукопись представляется в редакцию на *русском языке*. Зарубежные авторы могут присыпать статьи на *английском языке*. Возможна публикация статьи одновременно в двух вариантах — на русском и английском языках. В этом случае оформляются два текста статьи — на русском языке и точный перевод на английский. Вместе с рукописью представляются:

- *сопроводительное письмо* руководства организации, откуда исходит рукопись;
- *рекомендация* соответствующего академического (кафедры) или научного подразделения (заверенная выписка из протокола заседания подразделения);
- *экспертное заключение* о возможности опубликования, оформленное в организации, откуда исходит рукопись.

Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции.

2. Рукопись должна готовиться на компьютере в редакторе Microsoft Word для Windows (версии от Word 97 до Word 10; от Windows XP до Windows 10). Текст набирают шрифтом Times New Roman Сүр размером 14 пт с межстрочным интервалом 1,5, все поля — 20 мм. Обязательна нумерация страниц внизу посередине. Объем рукописи — до 12 страниц А4, включая иллюстрации, таблицы, библиографический список и сведения об авторах.

3. Состав рукописи статьи, правила и образец оформления см. на Internet-сайте журнала http://izvuzstr.sibstrin.ru/sample_of_article/a)

a) русскоязычная часть:

- индекс УДК — в левом верхнем углу, прописными буквами;
- инициалы, фамилии авторов;
- название статьи; — аннотация объемом до 1/3 страницы текста (не менее 80 слов);
- ключевые слова (не менее 5);
- текст статьи:
 - следует применять физические величины и их обозначения согласно международной системе СИ;
 - аббревиатуры и сокращения расшифровываются при первом использовании;
 - ф о р м у л ы набирать шрифтом Times New Roman в редакторе формул MS Equation или MathType, в статье должен быть необходимый минимум формул; все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента);
 - русские и греческие буквы и индексы, а также цифры, аббревиатуры и стандартные функции (Re, cos и др.) набираются прямым шрифтом; латинские буквы — курсивом;
 - во избежание смешения сходных изображений прописных и строчных букв *V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др., а также трудноразличимых букв и символов *l*, *e* и *1* (цифра), *n* и *p*, *J* и *J* и т.п. пояснения выполняются простым карандашом на полях;
 - и л л и о с т р а ц и и представляются в редакцию в виде файлов, созданных в Corel Draw или Microsoft Word, записанных с разрешением 300 дпі, с расширением cdr (предпочтительно) или .doc, фотографии — TIFF или JPEG; надписи и цифры набирать шрифтом Times New Roman, иллюстрации, в том числе фотографии, должны иметь хорошую проработку деталей и должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки);
 - иллюстрации распечатываются в двух экземплярах, с подписями к ним, размер иллюстрации — не более 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4;
 - т а б л и ц ы печатаются каждая на отдельном листе, все наименования в них даются полностью, без сокращения слов;
 - б и б л и о г р а ф и ч е с к и й с п и с о к (не менее 8 ссылок), составляется по следующим правилам:
в список включаются только опубликованные работы, в порядке упоминания в статье, ссылки на них в тексте статьи даются арабскими цифрами в квадратных скобках, в списке не должно быть нормативных документов (ГОСТов, СНиПов, технических регламентов, правовых актов и т.п. неавторизованных источников) — ссылки на них даются в тексте статьи в развернутом виде или в форме подстрочных сносок, библиографический список следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5–2008 (примеры см. на сайте http://izvuzstr.sibstrin.ru/oformlen/rules_and_examples_of_design_bibliographieskogo_list/), ссылки на интернет- сайты не допускаются;
 - для статей из зарегистрированных электронных журналов указываются фамилии и инициалы авторов, название статьи, название журнала, выходные данные выпуска, адрес сайта журнала и дата обращения к электронному ресурсу;
- с в е д е н и я о б а в т о р а х: последовательно для каждого — фамилия, имя, отчество (полностью), учченая степень, звания (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать), наименование учреждения, в котором работает автор, e-mail автора, страна (если не Российская Федерация);

б) англоязычная часть:

- сведения об авторах — последовательно для каждого:
 - фамилия, имя, отчество полностью, транслитерированные в латинские символы по системе BGN (использовать таблицу «правила транслитерации» см. на сайте http://izvuzstr.sibstrin.ru/oformlen/BGN_PCGN_romanization/);

(Окончание правил)

- ученая степень (DSc — доктор наук, PhD — кандидат наук, MSc — магистр, без указания научного направления), ученые звания (Professor, Assistant Professor, Academician of..., Cor. Member of... — профессор, доцент, академик ...), член-корреспондент ...), другое — Senior Lecturer (ст. преподаватель), Engineer (инженер), Post-graduate Student (аспирант), Student (студент);
 - официальное англоязычное название организации (учреждения), города (если не упоминается в наименовании организации), страны;
 - название статьи;
 - аннотация;
 - ключевые слова (Keywords);
 - библиографический список:
 - для зарубежных источников на латинице — с сохранением оригинального описания;
 - для ссылок на русскоязычные источники — транслитерированные с русских букв на латинские символы (по системе BGN) фамилии и инициалы всех авторов и название статьи; затем в квадратных скобках — название статьи в переводе на английский язык; остальные элементы библиографического описания на английском языке, с исключением разделителей /, —, // и заменой №, с. и С. соответственно на No., р. и Pp., в конце — (in Russia).
4. Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).
5. Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению; авторы могут сообщить редакции данные о специалистах по профилю статьи. Доработанную после рецензии статью присыпать в электронном виде.
6. Корректура статьи может предоставляться по запросу автора.
7. Гонорар за опубликование статьи не выплачивается.
8. Журнал публикует информацию о научно-технических разработках в области строительства объемом 1 с., включая 1–2 иллюстрации. Указываются разработчики ф. и. о. полностью, звания и контактная информация. Электронная версия обязательна.
9. Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не высыпаются.

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ****«СТРОИТЕЛЬСТВО»**

Журнал имеет разделы

Строительные конструкции
Теория инженерных сооружений
Строительные материалы и изделия
Экономика и организация строительства
Автоматизация и технология строительного производства
Гидротехническое строительство
Санитарная техника

Строительство автомобильных дорог и мостов
Строительные и дорожные машины
Научные проблемы архитектуры и экологии
Научно-методический раздел
В лабораториях вузов
Внедрение научных достижений в производство
Научная информация

На 1-е полугодие по каталогу «Роспечать» 2016 г.

каталожная цена за 6 месяцев — 3300 р.

цена отдельного номера — 550 р.

ББК 38
И 33
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО**

№ 1 (685) 2016

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*

Технический редактор *Н.М. Макаренко*

Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*

Корректор *Г.И. Шведкина*