МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РФ

МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ**

СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 9 (681)
Сентябрь 2015 г.

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

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. Правдивец, д-р техн. наук, проф.
В.Г. Себешев, почет. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф.
Ю.А. Феофанов, д-р техн. наук, проф.
Е.М. Чернышов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:
630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113
Тел./факс +7 (383) 266 28 59
www.sibstrin.ru E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 28.09.15. Формат 70×108 $^1/_{16}$.
Усл. печ. л. 11,03+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 9088.

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Дукарт А.В. Стационарные режимы колебаний линейной неконсервативной системы при периодических воздействиях произвольного вида 5

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Бердов Г.И., Елесин М.А., Кириленко А.В. Газобетон на основе известково-серного затворителя 12

Пименов С.И., Ибрагимов Р.А. Особенности гидратации цемента и кинетика твердения тяжелого бетона в зависимости от параметров тепловлажностной обработки 17

Овчаренко Г.И., Викторов А.В., Веселкова М.П. Смешанный шлакопортландцемент на шлаках разной тонкости помола ... 25

Абдрахимов В.З., Никулина Е.Ю., Абдрахимова Е.С. Инновационные направления по использованию отходов топливно-энергетического комплекса в производстве керамических материалов 31

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Дзюбенко Л.Ф., Кузнецова Ю.А., Соколова В.А. Опыт проектирования хвостохранилища комбинированного типа 44

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

Дмитриев М.П., Абраменков Д.Э., Гайдучик М.И., Гэндэн Баттулга, Малышев М.С., Абраменков Э.А. Пневматический ударный механизм молота с аккумуляционной и тормозной камерами и его физико-математическое описание 54

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

Городков А.В., Самохова Н.А. Акустический режим рекреационных территорий города и его оптимизация средствами озеленения периферийных зон 67

Строева Н.Н., Бацунова Т.П. Классификация велнес-центров в городской среде 74

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Гныря А.И., Коробков С.В., Мокшин Д.И., Кошин А.А., Гаусс К.С., Терехов В.И. Исследование теплообмена моделей системы зданий. Часть 2. Две призмы, находящиеся в следе 83

Кургузов В.Д., Демешкин А.Г. Зарождение трещин на поверхности концентраторов напряжений в виде круговых отверстий при сжатии образцов из квазихрупкого материала 91

Родевич В.В., Арзамасцев С.А. К расчету железобетонных элементов на изгиб с кручением 99

Сафиуллин Р.Г., Посохин В.Н. Численное моделирование движения капель при распыливании жидкости пористыми вращающимися распылителями. Часть 1. Результаты расчета траекторий движения капель в неподвижном воздухе 110

Шиляев М.И., Хромова Е.М., Гладкова Ю.С. Сравнение энергозатрат на обезвоживание угольного концентрата в центрифугах, вакуум-фильтрах и фильтр-прессах 119

НАУЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Владимиров С.А. Уникальный опыт ОАО «Газпром» по управлению сложнейшими крупномасштабными инвестиционными проектами 124

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE
OF RUSSIAN FEDERATION

INTERNATIONAL ASSOCIATION
OF CONSTRUCTION
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

**NEWS OF HIGHER
EDUCATIONAL INSTITUTIONS**

CONSTRUCTION

№ 9 (681)
September 2015

**Scientific-theoretical journal
Published since March 1958
Monthly**

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

Editorial Board:
A.A. Afanasyev, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS
V.A. Vorobyov, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS
V.A. Ignatyev, DSc (Eng), Prof.
V.I. Kostin, DSc (Eng), Prof. (Deputy Editor-in-Chief)
G.B. Lebedev, PhD, As. 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

© Publisher NSUACE (Sibstrin), 2015

CONTENTS

THE THEORY OF ENGINEERING STRUCTURES

Dukart A.V. Stationary vibrations of a linear non-conservative system with arbitrary periodic excitation 5

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Berdov G.I., Elesin M.A., Kirilenko A.V. Gas concrete on the basis of limy and sulphur water addition ... 12

Pimenov S.I., Ibragimov R.A. Especially cement hydration and kinetics hardening heavy concrete depending on parameters of heat and humidity treatment 17

Ovcharenko G.I., Viktorov A.V., Veselkova M.P. Mixed slag portland-tsement on slags of a different subtlety of a grinding 25

Abdrakhimov V.Z., Nikulina E.V., Abdrakhimova E.S. Innovative trends on the use of waste fuel and energy complex in the production of ceramic materials 31

HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Dzyubenko L.F., Kuznetsova Yu.A., Sokolova V.A. Design experience of a combined type tailings dam 44

BUILDING AND ROAD MACHINES

Dmitriev M.P., Abramenkov D.E., Gaiduchick M.I., Genden Battulga, Malyshev M.S., Abramenkov E.A. Air percussion mechanism of hummer with charging and breaking chambers andits physico-mathematical description 54

SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND ECOLOGY

Gorodkov A.V., **Samokhova N.A.** Acoustic mode of city recreational areas and its optimization by means of planting of greenery in peripheral areas 67

Stroeva N.N., **Batsunova T.P.** Classification of wellness centers in the urban environment 74

SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION

Gnyrya A.I., Korobkov S.V., Mokshin D.I., Koshin A.A., Gauss K.S., Terekhov V.I. Heat transfer model of the system of the building. Part 2. The two prisms, located in the following 83

Kurguzov V.D., **Demeshkin A.G.** Cracks initiation on a surface of stress concentrators in the form of circular openings at compression of samples from quasibrittle material 91

Rodevich V.V., Arzamastsev S.A. By the calculation of reinforced concrete elements under bend with torsion 99

Safiullin R.G., **Posokhin V.N.** Numerical simulation of droplet motion during atomization of liquid by porous rotating atomizer. Part 1. Calculation of droplet trajectories in still air 110

Shilyaev M.I., Khromova E.M., Gladkova Yu.S. Comparison of energy consumption for dewatering of coal concentrates in centrifuges, vacuum-filters and filter-press 119

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 624.042: 534.14

А.В. ДУКАРТ

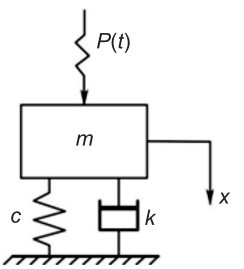
СТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ КОЛЕБАНИЙ ЛИНЕЙНОЙ НЕКОНСЕРВАТИВНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ ПРОИЗВОЛЬНОГО ВИДА

В замкнутой форме получено точное решение задачи об установившихся колебаниях демпфированной линейной системы с одной степенью свободы при произвольном законе изменения внешнего периодического воздействия, в том числе меняющем знак через полупериод. В основу решения положена функция, выражающая реакцию системы на действие единичной ступенчатой нагрузки. В качестве примера рассмотрены резонансные колебания системы при возмущающем воздействии типа «прямоугольный синус».

Ключевые слова: неконсервативная система, степень свободы, произвольное периодическое воздействие, стационарные режимы колебаний, ступенчатая нагрузка.

Проблема построения периодических режимов колебаний в дискретных и континуальных системах актуальна в динамике строительных конструкций и машин и в других технических приложениях [1–6]. Для ее решения разработаны аналитические и численные, точные и приближенные методы, в том числе автором данной работы [6–8]. В статье [8] на примере консервативной системы с одной степенью свободы предложен способ построения периодических режимов движения, в основу которого положена реакция системы на действие единичной ступенчатой нагрузки.

В настоящей статье аналогичный подход используется для решения более общей задачи о стационарных колебаниях неконсервативной системы, вызываемых периодическими воздействиями $P(t)$ произвольного вида. Будем считать, что функции $P(t)$ в промежутке времени $0 \le t \le T$ удовлетворяют условиям Дирихле [9]; T — период возмущающей нагрузки. Для определенности предполагается, что демпфирующие свойства системы описываются гипотезой линейно-вязкого трения [2]. В этом случае расчетная схема неконсервативной системы с одной степенью свободы соответствует приведенному рисунку, где через m, c и k обозначены масса, квазиупругий коэффициент и коэффициент вязкого трения системы; x — абсолютная координата массы m, отсчитываемая от положения статического равновесия при отсутствии внешнего воздействия.



Модель неконсервативной системы с одной степенью свободы

© Дукарт А.В., 2015

Остановимся сначала на решении задачи о колебаниях системы, вызываемых произвольной возмущающей нагрузкой $P(t)$ непериодического характера. Они, как и вынужденные колебания системы при периодическом воздействии, описываются дифференциальным уравнением

$$m\ddot{x}(t) + k\dot{x}(t) + cx(t) = P(t)\,, \tag{1}$$

общее решение которого складывается [9] из общего решения соответствующего (1) однородного уравнения [5]

$$x_0(t) = e^{-ht}(A \sin \omega_1 t + B \cos \omega_1 t) \tag{2}$$

и какого-либо его частного решения $x_*(t)$. Для вычисления последнего воспользуемся функцией [10]

$$R(t-\tau) = \frac{1}{c}\left\{1 - e^{-h(t-\tau)}\left[\cos\omega_1(t-\tau) + \frac{h}{\omega_1}\sin\omega_1(t-\tau)\right]\right\}, \tag{3}$$

определяющей колебания системы при $t \geq \tau$, вызываемые внезапно приложенной единичной силой в момент времени $t = \tau$. Эта функция носит название реакции системы на действие единичной ступенчатой нагрузки [5, 10]. В (2) и (3) введены обозначения: $h = k/(2m)$; $\omega_1 = \sqrt{\omega^2 - h^2}$ — частота свободных колебаний системы с учетом демпфирования; $\omega = \sqrt{c/m}$ — частота собственных колебаний системы.

Используя функцию (3), можно частное решение уравнения (1) записать в виде

$$x_*(t) = P(0)R(t) + \int_0^t \dot{P}(\tau)R(t-\tau)d\tau\,, \tag{4}$$

где $R(t)$ соответствует (3) при $\tau = 0$. В (4) точкой над $P(\tau)$ обозначена операция дифференцирования по τ (а далее также по t).

Суммируя (2) и (4), найдем общее решение уравнения (1)

$$x(t) = e^{-ht}(A\sin\omega_1 t + B\cos\omega_1 t) + P(0)R(t) + \int_0^t \dot{P}(\tau)R(t-\tau)d\tau\,. \tag{5}$$

Для определения скорости массы системы следует продифференцировать функцию $x(t)$ по времени:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) = e^{-ht}[(\omega_1\cos\omega_1 t - h\sin\omega_1 t)A - (\omega_1\sin\omega_1 t + h\cos\omega_1 t)B] + \\ + P(0)\frac{dR(t)}{dt} + \int_0^t \dot{P}(\tau)\frac{dR(t-\tau)}{dt}d\tau.\end{aligned} \tag{6}$$

Входящие в (2), (5) и (6) постоянные A, B при непериодическом воздействии определяются, исходя из начальных условий движения системы — начального отклонения x_0 и начальной скорости υ_0 массы m.

Учитывая, что

$$\int_0^t \dot{P}(\tau)d\tau = P(\tau)\,|_0^t = P(t) - P(0)\,,$$

после подстановки (3) в (5), (6) функции отклонения и скорости массы m принимают вид

$$x(t)=e^{-ht}\left\{A\sin\omega_1 t+B\cos\omega_1 t+\frac{1}{c}e^{ht}P(t)-\frac{1}{c}P(0)\left(\cos\omega_1 t+\frac{h}{\omega_1}\sin\omega_1 t\right)-\right.$$
$$\left.-\frac{1}{c}\left[\left(\cos\omega_1 t+\frac{h}{\omega_1}\sin\omega_1 t\right)W_1(t)+\left(\sin\omega_1 t-\frac{h}{\omega_1}\cos\omega_1 t\right)W_2(t)\right]\right\}; \tag{7}$$

$$\dot{x}(t)=e^{-ht}\left\{(\omega_1\cos\omega_1 t-h\sin\omega_1 t)A-(\omega_1\sin\omega_1 t+h\cos\omega_1 t)B+\frac{1}{c}e^{ht}\dot{P}(t)+\right.$$
$$\left.+\frac{1}{m\omega_1}P(0)\sin\omega_1 t+\frac{1}{m\omega_1}[W_1(t)\sin\omega_1 t-W_2(t)\cos\omega_1 t]\right\}.$$

Здесь

$$W_1(t)=\int_0^t\dot{P}(\tau)e^{h\tau}\cos\omega_1\tau\,d\tau;\quad W_2(t)=\int_0^t\dot{P}(\tau)e^{h\tau}\sin\omega_1\tau\,d\tau.$$

Воспользуемся уравнениями движения (7) для решения исходной задачи определения стационарных режимов колебаний системы. Рассмотрим сначала установившиеся колебания системы периода T для наиболее общего случая периодического воздействия $P(t) - P(t + T) \equiv 0$. В этом случае стационарные колебания системы $x(t)$ должны иметь тот же период, что и возмущающая нагрузка, т.е. искомое решение $x(t)$ следует подчинить условиям периодичности вида

$$x(0)=x(T);\quad \dot{x}(0)=\dot{x}(T). \tag{8}$$

Выразим отклонения и скорости массы системы в моменты времени $t = 0$ и $t = T$, используя (7). Подставляя их далее в условия (8), получим относительно постоянных A, B систему двух алгебраических уравнений, из решения которой следует

$$A=\frac{1}{2c\omega_1(chhT-\cos\omega_1 T)}\{P(T)[h(e^{hT}-\cos\omega_1 T)-\omega_1\sin\omega_1 T]+$$
$$+[P(0)+U_0][h(e^{-hT}-\cos\omega_1 T)+\omega_1\sin\omega_1 T]+[\dot{P}(T)-\dot{P}(0)]\times$$
$$\times(e^{hT}-\cos\omega_1 T)+[(\omega_1(e^{-hT}-\cos\omega_1 T)-h\sin\omega_1 T]V_0\}; \tag{9}$$

$$B=\frac{1}{2c\omega_1(chhT-\cos\omega_1 T)}\{P(T)[\omega_1(e^{hT}-\cos\omega_1 T)+h\sin\omega_1 T]+$$
$$+[P(0)+U_0][\omega_1(e^{-hT}-\cos\omega_1 T)-h\sin\omega_1 T]+[\dot{P}(T)-\dot{P}(0)]\sin\omega_1 T-$$
$$-[h(e^{-hT}-\cos\omega_1 T)+\omega_1\sin\omega_1 T]V_0\},$$

где

$$U_0=\int_0^T\dot{P}(\tau)e^{h\tau}\cos\omega_1\tau\,d\tau;\quad V_0=\int_0^T\dot{P}(\tau)e^{h\tau}\sin\omega_1\tau\,d\tau.$$

Внесем постоянные (9) в первое из уравнений (7). В результате найдем искомое периодическое решение в виде

$$x(t)=\frac{e^{-ht}}{c\omega_1}\Big\langle \omega_1 e^{ht}P(t)+\frac{1}{2(chhT-\cos\omega_1 T)}\{P(T)[e^{hT}(h\sin\omega_1 t+\omega_1\cos\omega_1 t)-$$
$$-h\sin\omega_1(t-T)-\omega_1\cos\omega_1(t-T)]+[P(0)+U_0][e^{-hT}(h\sin\omega_1 t+\omega_1\cos\omega_1 t)-$$
$$-h\sin\omega_1(t+T)-\omega_1\cos\omega_1(t+T)]+[\dot{P}(T)-\dot{P}(0)][e^{hT}\sin\omega_1 t-\sin\omega_1(t-T)]+$$
$$+[e^{-hT}(\omega_1\sin\omega_1 t-h\cos\omega_1 t)-\omega_1\sin\omega_1(t+T)+h\cos\omega_1(t+T)]V_0\}-$$
$$-[P(0)+W_1(t)](\omega_1\cos\omega_1 t+h\sin\omega_1 t)-(\omega_1\sin\omega_1 t-h\cos\omega_1 t)W_2(t)\Big\rangle. \tag{10}$$

Решение (10) упрощается при резонансных колебаниях, когда период возмущающей нагрузки T совпадает с периодом свободных колебаний, т.е. при $T = 2\pi/\omega_1$. Уравнение (10), удовлетворяющее условиям (8), является периодическим с периодом T и определяет движение массы системы в интервале времени $0 \le t \le T$. Учитывая периодичность решения (10) его можно без изменений сместить в соседние промежутки времени $[T, 2T]$, $[2T, 3T]$ и т.д.

Рассмотрим далее установившиеся колебания системы для случая периодического воздействия, изменяющего знак через полупериод. Такая возмущающая нагрузка для любого момента времени удовлетворяет условию $P(t) + P(t + 0{,}5T) \equiv 0$. В этом случае периодическое решение уравнения (1) должно быть подчинено следующим условиям периодичности:

$$x(0)=-x(0{,}5T);\quad \dot{x}(0)=-\dot{x}(0{,}5T)\,. \tag{11}$$

Использование условий (11) с учетом (9) приводит к системе уравнений относительно постоянных A, B, решение которой имеет вид

$$A=\frac{1}{2\omega_1 c(ch0{,}5hT+\cos 0{,}5\omega_1 T)}\{[P(0)+U][h(\cos 0{,}5\omega_1 T+e^{-0{,}5hT})-$$
$$-\omega_1\sin 0{,}5\omega_1 T]-P(0{,}5T)[\omega_1\sin 0{,}5\omega_1 T+h(\cos 0{,}5\omega_1 T+e^{0{,}5hT})]-$$
$$-[\dot{P}(0{,}5T)+\dot{P}(0)](\cos 0{,}5\omega_1 T+e^{0{,}5hT})+$$
$$+[\omega_1(\cos 0{,}5\omega_1 T+e^{-0{,}5hT})+h\sin 0{,}5\omega_1 T]V\}; \tag{12}$$

$$B=\frac{1}{2\omega_1 c(ch0{,}5hT+\cos 0{,}5\omega_1 T)}\{[P(0)+U][\omega_1(\cos 0{,}5\omega_1 T+e^{-0{,}5hT})+$$
$$+h\sin 0{,}5\omega_1 T]+P(0{,}5T)[h\sin 0{,}5\omega_1 T-\omega_1(\cos 0{,}5\omega_1 T+e^{0{,}5hT})]+$$
$$+[\dot{P}(0{,}5T)+\dot{P}(0)]\sin 0{,}5\omega_1 T+$$
$$+[\omega_1\sin 0{,}5\omega_1 T-h(\cos 0{,}5\omega_1 T+e^{-0{,}5hT})]V\},$$

где

$$U=\int_0^{0{,}5T}\dot{P}(\tau)e^{h\tau}\cos\omega_1\tau\,d\tau;\quad V=\int_0^{0{,}5T}\dot{P}(\tau)e^{h\tau}\sin\omega_1\tau\,d\tau.$$

Подставим (12) в первое из уравнений (7), в результате найдем искомый стационарный режим движения системы в промежутке времени [0; 0,5T]:

$$x(t)=\frac{e^{-ht}}{c\omega_1}\Big\langle \omega_1 e^{ht}P(t)+\frac{1}{2(ch0,5hT+\cos 0,5\omega_1 T)}\{[P(0)+U][h\sin\omega_1(t+0,5T)+$$
$$+\omega_1\cos\omega_1(t+0,5T)+e^{-0,5hT}(h\sin\omega_1 t+\omega_1\cos\omega_1 t)]-P(0,5T)\times$$
$$\times[\omega_1\cos\omega_1(t-0,5T)+h\sin\omega_1(t-0,5T)+e^{0,5hT}(h\sin\omega_1 t+\omega_1\cos\omega_1 t)]-$$
$$-[\dot P(0,5T)+\dot P(0)][\sin\omega_1(t-0,5T)+e^{0,5hT}\sin\omega_1 t]+[\omega_1\sin\omega_1(t+0,5T)-$$
$$-h\cos\omega_1(t+0,5T)+e^{-0,5hT}(\omega_1\sin\omega_1 t-h\cos\omega_1 t)]V\}-[P(0)+W_1(t)]\times$$
$$\times(\omega_1\cos\omega_1 t+h\sin\omega_1 t)-(\omega_1\sin\omega_1 t-h\cos\omega_1 t)W_2(t)\Big\rangle. \tag{13}$$

Входящие в (13) функции $W_1(t)$ и $W_2(t)$ определяются вышеприведенными интегралами. Движение системы в интервале времени $0,5T \le t \le T$ находится нечетным продолжением решения (13): $x(t + 0,5T) = -x(t)$. На основании периодичности движения необходимо колебания системы в промежутке времени [0, T] повторить в интервалах [T, 2T], [2T, 3T] и т.д.

Отметим, что при отсутствии демпфирования (h = 0; $\omega_1 = \omega$) решения (10), (13) совпадают с уравнениями движения консервативной системы, полученными в работе [8].

В качестве примера найдем закон резонансных колебаний неконсервативной системы с одной степенью свободы, вызванных периодическим воздействием типа «прямоугольный синус»:

$$P(t)=\begin{cases} P_0 & \text{при} \quad 0^+ \le t \le 0,5T^-, \\ -P_0 & \text{при} \quad 0,5T^+ \le t \le T^-, \end{cases} \tag{14}$$

где знаками «–» и «+» обозначены моменты времени непосредственно до и после скачкообразного изменения воздействия при $t = \pm 0,5nT$; n = 0, 1, 2, 3,....

Возмущающая нагрузка (14) меняет знак через полупериод, поэтому достаточно определить стационарные колебания системы в интервале $0 \le t \le 0,5T$, воспользовавшись для этого решением (13). Для рассматриваемого воздействия (14)

$$P(t) = P(0) = P(0,5T) = P_0; \quad \dot P(\tau) = \dot P(0) = \dot P(0,5T) = 0;$$
$$U = 0;\ V = 0;\ W_1(t) = 0;\ W_2(t) = 0. \tag{15}$$

Внося (15) в (13) и учитывая, что при резонансе $T = 2\pi/\omega_1$, после некоторых упрощений найдем искомое периодическое решение задачи в замкнутой форме

$$x(t)=\frac{P_0}{c}\left[1-\frac{2e^{-ht}}{1-e^{-0,5hT}}\left(\cos\omega_1 t+\frac{h}{\omega_1}\sin\omega_1 t\right)\right], \tag{16}$$

которое совпадает с известным уравнением движения системы, полученным в монографии [11].

Отметим, что предложенный подход к определению стационарных режимов колебаний может быть распространен на более сложные дискрет-

ные и континуальные системы, в частности, на системы с пропорциональным трением. В этом случае, он может применяться в сочетании с методом разложения решения по формам колебаний (методом главных координат) [5, 10].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бабицкий В.И. Теория виброударных систем (приближенные методы). М.: Наука, 1978. 352 с.
2. Вибрации в технике: справ. Т. 1: Колебания линейных систем / под ред. В.В. Болотина. М.: Машиностроение, 1978. 352 с.
3. Диментберг Ф.М., Шаталов К.Т., Гусаров А.А. Колебания машин. М.: Машиностроение, 1964. 308 с.
4. Динамический расчет зданий и сооружений: справ. проектировщика / под ред. Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича. М.: Стройиздат, 1984. 303 с.
5. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Л.: Политехника, 1990. 272 с.
6. Дукарт А.В. Задачи теории ударных гасителей колебаний. М.: Изд-во АСВ, 2006. 208 с.
7. Дукарт А.В. Об установившихся колебаниях двухмассовой системы с демпфированием при произвольной периодической возмущающей нагрузке // Изв. вузов. Строительство. 2009. № 3–4. С. 3–13.
8. Дукарт А.В. К определению установившихся колебаний линейной системы при произвольной периодической возмущающей нагрузке // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 8. С. 5–12.
9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. 832 с.
10. Тонг Кин Н. Теория механических колебаний. М.: Машгиз, 1963. 352 с.
11. Пановко Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. М.: Физматгиз, 1960. 196 с.

***Дукарт Адам Вилебальдович**, д-р техн. наук, проф.*
Московский государственный строительный университет

Получено 07.08.15

Dukart Adam Vilebaldovich, DSc, professor, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

STATIONARY VIBRATIONS OF A LINEAR NONCONSERVATIVE SYSTEM WITH ARBITRARY PERIODIC EXCITATION

The exact solution of the problem of steady state oscillations of a damped linear system with one degree of freedom under an arbitrary periodic force is considered. The result is obtained using the analytical solution for the system response to the action of the unit step load. As an example, the resonant vibrations of the system at rectangular-sine like load are found.

Keywords: nonconservative system, degree of freedom, arbitrary periodic impacts, stationary oscillations, step load.

REFERENCES

1. Babitskiy V.I. Teoriya vibroudarnykh sistem (priblizhennye metody) [Theory of vibroimpact systems (approximate methods)]. M., Nauka, 1978, 352 p. (rus.)
2. Vibratsii v tekhnike: sprav. T. 1: Kolebaniya lineynykh sistem; pod ped. V.V. Bolotina [Vibrations in technique: Handbook. Vol. 1. Vibrations of linear systems; ed. by V.V. Bolotin]. M., Mashinostroenie, 1978. 352 p. (rus.)
3. Dimentberg F.M., Shatalov K.T., Gusarov A.A. Kolebaniya mashin [Vibrations of machines]. M., Mashinostroenie, 1964, 308 p. (rus.)
4. Dinamicheskiy raschet zdaniy i sooruzheniy: sprav. proektirovshchika; pod red. B.G. Koreneva, I.M. Rabinovicha [Dinamic analysis of buildings and structures: designer's handbook; ed. by B.G. Korenev, I.M. Rabinovich]. M., Stroyizdat, 1984, 303 p. (rus.)
5. Panovko Ya.G. Osnovy prikladnoy teorii kolebaniy i udara [Basics of applied theory of vibrations and impact]. L., Politekhnika, 1990, 272 p. (rus.)
6. Dukart A.V. Zadachi teorii udarnykh gasiteley kolebaniy [Problems of theory of impact vibration damper]. M., ASV, 2006, 208 p. (rus.)
7. Dukart A.V. Ob ustanovivshikhsya kolebaniyakh dvukhmassovoy sistemy s dempfirovaniem pri proizvol'noy periodicheskoy vozmushchayushchey nagruzke [On periodic oscillations of a two-mass damped system with an arbitrary exciting force]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction], 2009, No. 3–4, pp. 3–13 (rus.)
8. Dukart A.V. K opredeleniyu ustanovivshikhsya kolebaniy lineynoy sistemy pri proizvol'noy periodicheskoy vozmushchayushchey nagruzke [Determination of steady state vibrations of linear system under periodic excitation]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction], 2015, No. 8, pp. 5–12 (rus.)
9. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Mathematics handbook for scientists and engineers]. M., Nauka, 1973, 832 p. (rus.)
10. Tong Kin N. Teoriya mekhanicheskikh kolebaniy [Theory of mechanical vibration]. M., Mashgiz, 1963, 352 p. (rus.)
11. Panovko Ya.G. Vnutrennee trenie pri kolebaniyakh uprugikh sistem [Internal friction at the oscillations of elastic systems]. M., Fizmatgiz, 1960, 196 p. (rus.)

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.327 : 666.973.6

Г.И. БЕРДОВ, М.А. ЕЛЕСИН, А.В. КИРИЛЕНКО

ГАЗОБЕТОН НА ОСНОВЕ ИЗВЕСТКОВО-СЕРНОГО ЗАТВОРИТЕЛЯ

В данной работе представлен метод изготовления ячеистого бетона на известково-серном затворителе и исследована зависимость его коэффициента конструктивного качества от количества и вида наполнителей, содержащих железо в различной степени окисления, таких как наполнители Fe_3O_4, FeO и $Fe(OH)_3$.

Ключевые слова: газобетон, портландцемент, механическая прочность, известково-серный затворитель, гидразин.

В современном строительстве облегчение тяжелого бетона делается преимущественно за счет использования пористого заполнителя либо поризацией непосредственно вяжущей основы бетонной смеси [1–3]. К числу легких бетонов относится также газобетон. Являясь компромиссной между соблюдением нормативной прочности и желаемым максимальным снижением плотности, такая технология по-разному влияет на эффективность типов легкого бетона, оцениваемую сочетанием максимального коэффициента конструктивного качества (ККК) с пределом прочности на сжатие ($R_{сж}$). В частности, в силу того, что концентрация вяжущего в поризованной смеси уменьшается пропорционально объему пор, при одинаковом ККК газобетон по эффективности уступает конгломератному бетону, несмотря на упрочнение межпоровых перегородок автоклавированием. К тому же, по причине технических сложностей автоклавной технологии производство крупногабаритных изделий из газобетона затруднено. Для экономически обоснованного безавтоклавного производства высокопрочного газобетона необходимо упрочнение межпоровых перегородок.

Целесообразна поризация однородной портландцементной массы с добавкой соединений минерального наполнителя, которые совместным действием с продуктами гидратации способствуют образованию более прочной и в большей степени однородной структуры поризованного камня.

В данной работе использован метод синтеза полисиликатов гидратацией клинкерных минералов, в котором содержащийся в вяжущей смеси ион Fe(II), встраиваясь большим числом в катионную группу, координирует в кристаллической решетке элементы многозарядного макроаниона [4]. Создаваемый в процессе гидратации дефицит в жидкой фазе гидроксида $Ca(OH)_2$ и свободнодиффундируемых молекул воды в электролите тормозит образование кристаллогидратов и одновременно инициирует глубокую полимеризацию кремнекислородного тетраэдра, вплоть до образования в при-

© Бердов Г.И., Елесин М.А., Кириленко А.В., 2015

сутствии иона Fe(II) полисиликатов, преимущественно из ряда амфиболов, которые, кристаллизуясь, образуют плотные решетки.

Представляется весьма рациональным в технологии газобетона использование восстановителя, продуцирующего Fe(II), что расширяет номенклатуру используемых материалов, содержащих не только Fe(II), например, в соединениях Fe_3O_4, FeO, в металлургических шлаках на основе файолита $2FeO{\cdot}SiO_2$, но и соединений Fe(III). К числу последних относится исследуемый в работе трудноутилизируемый техногенный гидроксид $Fe(OH)_3$, содержащийся в промышленных отходах в виде обезвоженных кеков и шламов.

В безавтоклавной технологии высокопрочного газобетона совмещается продуцирование иона Fe(II) и поризатора путем использования в качестве восстановителя гидразина в соответствии с реакцией:

$$2Fe^{3+} + N_2H_4 \xrightarrow{4OH^-} 2Fe^{2+} + N_2\uparrow + 4H_2O.$$

При таком совмещении процессов влияние наполнителя на прочность и плотность образцов газобетона будет обусловлено действием ингредиентов в соответствии с реакцией и ионами Fe(II), изначально содержащимися в наполнителе. В процессе твердения поризованного теста прочность будет обеспечиваться за счет образования более прочных полисиликатов.

В работе затворителем служил плотный известково-серный отвар, содержащий 250 г/л общей растворенной серы в составе полисульфидов CaS_n и тиосульфата CaS_2O_3. Порошкообразный наполнитель был представлен гидроксидом $Fe(OH)_3$, закись-окисью Fe_3O_4 и закисным железом FeO. Количество гидразина брали в расчете на полное восстановление всей массы окисного железа в наполнителе. В работе использовали портландцемент М400 Норильского цементного завода (минералогический состав, мас. %: C_3S 58,42; C_2S 17,35; C_3A 7,8; C_4AF 13,25), удельная поверхность портландцемента составляла 3000 см^2/г.

Порядок приготовления бетонной смеси был следующий. В мешалку загружалось расчетное количество затворителя с заполнителем и перемешивалось в течение 2 мин. Затем загружались вяжущее и порошкообразные добавки, перемешивались в течение 2 мин, добавлялась суспензия газообразователя, и масса дополнительно перемешивалась в течение 1 мин. После этого измерялась подвижность полученной растворной смеси, которая заливалась в формы размером 10× 10× 10 см.

Вспучивание и предварительная выдержка образцов производились при температуре окружающей среды 20–25 °С и относительной влажности 60–75 %. В период выдержки производились замеры пластической прочности. После достижения требуемой пластической прочности образца срезалась горбушка. Прочность ячеистого бетона определялась испытанием шести образцов при сжатии на лабораторном прессе, развивающем максимальную нагрузку $5 \cdot 10^5$ Н.

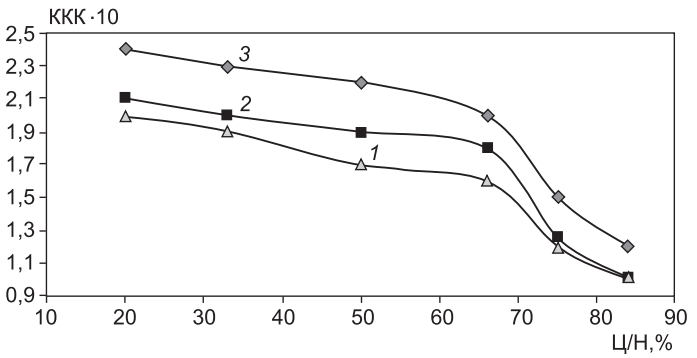
Переменной величиной, влияющей на прочность образцов после твердения в нормальных условиях в течение 28 сут, являлось соотношение цемента и наполнителя, определяющее содержание в вяжущей массе железа

Свойства образцов ячеистого бетона на известково-серном затворителе с добавкой соединений железа различной степени окисления

Соотношение цемент : заполнитель		Плотность ρ, кг/м³	Прочность $R_{сж}$, МПа	ККК $R_{сж}/\rho$
Наполнитель Fe_3O_4	1:5	1300	13,5	0,10
	1:3	1200	14,9	0,12
	1:2	1150	17,7	0,16
	1:1	1120	19,1	0,17
	2:1	1018	19,6	0,19
Наполнитель FeO	1:5	1300	14,0	0,10
	1:3	1200	15,4	0,13
	1:2	1180	16,7	0,18
	1:1	1100	21,8	0,19
	2:1	1050	22,0	0,20
Наполнитель $Fe(OH)_3$	1:5	940	12,5	0,12
	1:3	910	13,7	0,15
	1:2	770	15,8	0,20
	1:1	715	16,4	0,22
	2:1	750	16,9	0,23

разной степени окисления. Результаты опытов в виде показателей $R_{сж}$ и плотности образцов приведены в таблице.

О механизме влияния соединений железа разной степени окисления можно судить по изменению результирующего показателя ККК (рисунок). Прослеживается однотипный характер зависимости ККК от содержания в вяжущей смеси разных типов наполнителя. В частности, на кривых выделяется область высоких значений ККК, мало изменяющихся по мере снижения соотношения Ц/Н от 2 : 1 до 1 : 3.



Зависимость ККК ячеистого бетона на известково-серном затворителе от количества и вида наполнителей, содержащих железо в различной степени окисления

Наполнитель: *1* — Fe_3O_4; *2* — FeO; *3* — $Fe(OH)_3$

Относительно постоянное значение ККК вызвано малозаметным снижением $R_{сж}$. Характерное для обычного газобетона снижение ККК в данном случае компенсируется ростом концентрации в цементном камне плотных и прочных полисиликатов.

Наблюдаемое в последующем на кривых по мере роста отношения Ц/Н заметное снижение ККК обусловлено исчерпанием в вяжущей смеси гидратационно-ионизированных кремнекислородных тетраэдров как источника для образования полисиликатов. При переходе от $Fe(OH)_3$ к FeO прослеживается рост прочности, вызванный смещением равновесия в системе между поризатором и массой иона Fe(II).

Таким образом, использование наполнителей, содержащих ионы Fe^{2+}, способные встраиваться в структуру полисиликатов, обеспечивает получение газобетона неавтоклавного твердения, сочетающего высокий коэффициент конструктивного качества и высокую прочность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сахаров Г.П., Скориков Е.П. Неавтоклавный энергоэффективный поробетон естественного твердения // Изв. вузов. Строительство. 2005. № 7. С. 49–54.
2. Леонтьев Е.Н., Коковин О.А. К вопросу о неавтоклавном газобетоне // Технология бетонов. 2007. № 5. С. 50–52.
3. Аминев Г.Г. Малоцементный неавтоклавный ячеистый бетон // Строит. материалы. 2005. № 12. С. 50–51.
4. Елесин М.А., Бердов Г.И., Умнова Е.В. Высокопрочный ячеистый бетон // Техника и технология силикатов. 2015. Т. 72, № 1. С. 24–28.

***Бердов Геннадий Ильич**, д-р техн. наук, проф.*
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
***Елесин Михаил Анатольевич**, канд. техн. наук, проф.*
Норильский индустриальный институт
***Кириленко Алексей Валерьевич**, ассист.*
Норильский индустриальный институт

Получено 26.08.15

Berdov Gennady Ilyich, DSc, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Elesin Mikhail Anatolyevich, PhD, professor, Norilsk State Industrial Institute, Russia
Kirilenko Alexey Valerievich, assistant, Norilsk State Industrial Institute, Russia

GAS CONCRETE ON THE BASIS OF LIMY AND SULPHUR WATER ADDITION

This article provides a method for the manufacture of aerated concrete in the lime-sulfur a mixing and studied as a function of its coefficient of constructive quality of quant-tion and type of fillers containing iron in different oxidation states, such as filler Fe_3O_4, filler FeO and filler Fe $(OH)_3$.

Keywords: gas concrete, portland cement, mechanical durability, limy and sulfur water addition, hydrazine.

REFERENCES

1. Saharov G.P., Skorikov E.P. Neavtoklavnyy energoeffektivnyy porobeton estestvennogo tverdeniya [Non-autoclave power-effective poroconcrete of natural

hardening]. Izv. vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction], 2005, No. 7, pp. 49–54 (rus.)
2. Leontiev E.N., Kokovin O.A. K voprosu o neavtoklavnom gazobetone [On the issue of non-autoclaved aerated concrete]. Tekhnologiya betonov [Concrete technology], 2007, No. 5, pp. 50–52 (rus.)
3. Aminev G.G. Malotsementnyy neavtoklavnyy yacheistyy beton [Low-cement not autoclave cellular concrete]. Stroitel'nye materialy [Construction materials], 2005, No. 12, pp. 50–51 (rus.)
4. Elesin M.A., Berdov G.I., Umnova E.V. Vysokoprochnyy yacheistyy beton [High-strength porous concrete]. Tekhnika i tekhnologiya silikatov [Technique and technology of silicates], 2015, Vol. 72, No. 1, pp. 24–28 (rus.)

УДК 691.327 : 666.972.7

С.И. ПИМЕНОВ, Р.А. ИБРАГИМОВ

ОСОБЕННОСТИ ГИДРАТАЦИИ ЦЕМЕНТА И КИНЕТИКА ТВЕРДЕНИЯ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

Работа посвящена изучению влияния температуры изотермического прогрева при тепловлажностной обработке (ТВО) на кинетику набора прочности тяжелого бетона, полученного активацией вяжущего в роторно-пульсационном аппарате. Проведен сравнительный анализ бетонных образцов после ТВО с температурой изотермической выдержки 30, 40 и 80 °С. Показаны способы получения различных классов бетона в зависимости от температуры ТВО и при механохимической активации (МХА) цементной суспензии. Выявлен характер гидратации цемента при ТВО, подвергнутого МХА.

Ключевые слова: тепловлажностная обработка, механохимическая активация, тяжелый бетон.

Интенсификация производства изделий из бетона и железобетона — одна из важнейших проблем [1], для ее решения необходимо применять комплекс мер: тепловлажностную обработку (ТВО) бетонных изделий, снижение водоцементного отношения бетонной смеси, введение суперпластификаторов, добавок ускорителей твердения [2].

ТВО бетонных и железобетонных изделий является основным способом повышения мощности производства. Температура теплоносителя при ТВО бетонных изделий в нашей стране обычно составляет 80–90 °С, длительность изотермического прогрева — от 8 до 24 ч [3]. Это позволяет получить отпускную прочность изделий в очень короткие сроки. Включение такой обработки в технологический процесс изготовления изделий дает возможность увеличить оборачиваемость форм, сократить длительность общего цикла производства. Но ТВО изделий ведет к значительному удорожанию конечной стоимости изделий, а также к снижению некоторых механических показателей.

Наряду с ускорением твердения бетона с помощью ТВО существуют различные способы повышения кинетики твердения бетона путем активации вяжущего. Как уже было показано [4, 5], механохимическая активация (МХА) вяжущего позволяет значительно повысить механическую прочность получаемых бетонов и растворов, особенно в ранние сроки. В связи с этим изучение влияния совместного действия МХА вяжущего и ТВО получаемых изделий с целью сокращения сроков распалубки или продолжительности изотермического прогрева представляет существенный научный и практический интерес.

© Пименов С.И., Ибрагимов Р.А., 2015

Авторами проведены исследования по совместному влиянию ТВО бетона и МХА цементной суспензии на кинетику набора прочности тяжелого бетона.

Для эксперимента определен тяжелый бетон производственного состава (Ц = 490 кг/м^3, П = 555 кг/м^3, Щ = 1315 кг/м^3) класса В25 с осадкой конуса 7–9 см. Заполнителями служили обогащенный песок Камского месторождения с модулем крупности 2,7, гранитный щебень Уральского месторождения фракции 5–20 мм. В качестве вяжущего использовали портландцемент Ульяновского завода ЦЕМ III/А 32,5Н, отвечающий требованиям ГОСТ 31108–2003.

Механохимическую активацию цементной суспензии проводили в роторно-пульсационном аппарате (РПА) 0.8-55А-2.2УЗ, производимом по ТУ 5132-001-70447062.

Эксперимент проводили следующим образом: предварительно 50 % от общей массы цемента перемешивали с водой затворения и подвергали МХА в РПА в течение 2 мин. Затем в полученную суспензию добавляли оставшуюся часть цемента, крупный и мелкий заполнители и перемешивали в бетоносмесителе в течение 5 мин. Из бетонных смесей изготавливали образцы — кубы размером 10 × 10 × 10 см. В возрасте 1, 3 и 28 сут после ТВО и хранения в нормально-влажностных условиях образцы подвергали механическим испытаниям. Режим ТВО составил: 2 ч — выдержка; 2 ч — подъем температуры; 10 ч — изотермический прогрев; 2 ч — спуск температуры. ТВО тяжелого бетона проводили при различной температуре изотермической выдержки: 1 — при естественном твердении; 2 — при 30 °С; 3 — при 40 °С; 4 — при 80 °С.

На рис. 1 изображена кинетика набора прочности бетонов, изготовленных различными способами. Прочность тяжелого бетона определяли в соответствии с ГОСТ 10180–2012. На рис. 1, *а* показано влияние температуры изотермической выдержки на прочность при сжатии контрольных образцов (состав № 1), на рис. 1, *б* — образцов, полученных активацией вяжущего в РПА без применения добавок (состав № 2).

Известно, что применение суперпластификаторов позволяет значительно повысить прочность бетона, одновременно снижая количество воды затворения. В связи с этим актуальным становится вопрос изучения влияния МХА цементной суспензии, модифицированной суперпластификатором, на кинетику набора прочности тяжелого бетона при ТВО.

В качестве суперпластификатора использовали добавку реламикс Т-2 — продукт конденсации на основе натриевой соли нафталинсульфокислоты и формальдегида, производимого по ТУ 5870-002-14153664-04, в количестве 1 % от массы цемента.

На рис. 2, *а* показана кинетика набора прочности тяжелого бетона, полученного модификацией вяжущего добавкой реламикс Т-2 (состав № 3), в зависимости от температуры изотермического прогрева, на рис. 2, *б* — кинетика набора прочности тяжелого бетона в зависимости от температуры прогрева при ТВО, полученного модификацией вяжущего добавкой реламикс Т-2 с последующей активацией в РПА (состав № 4).

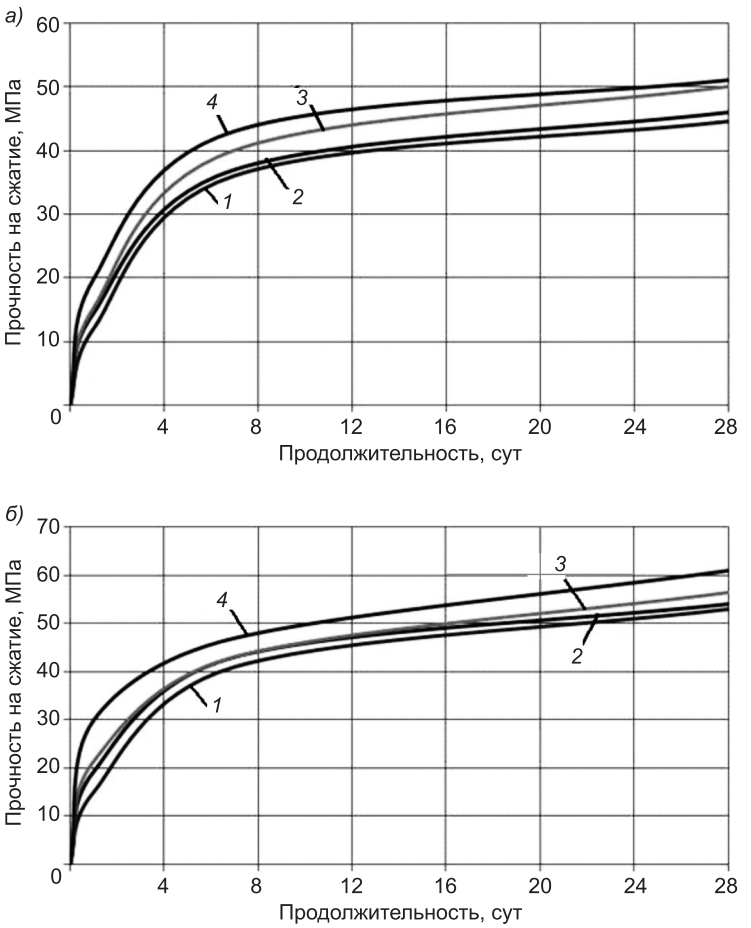


Рис. 1. Кинетика набора прочности состава № 1 (*а*) и состава № 2 (*б*)

1 — при естественном твердении; *2* — при температуре изотермической выдержки 30 °С; *3* — при температуре изотермической выдержки 40 °С; *4* — при температуре изотермической выдержки 80 °С

Из представленных данных видно, что для всех составов общая зависимость проявляется в повышении прочности на сжатие тяжелого бетона при увеличении температуры изотермического прогрева. Так, для состава № 1 повышение прочности на сжатие в 1 сут составляет от 20 до 73 %, на 28 сут от 4 до 14 %, для состава № 2 — от 30 до 100 % в 1 сут твердения, от 3 до 15 % на 28 сут, у состава № 3 — от 20 до 142 % в суточном, а в марочном возрасте — от 4 до 10 %. Для состава № 4 повышение суточной прочности составляет от 17 до 65 %, к 28 сут прочность увеличивается от 3 до 6 %.

Анализируя полученные данные, видно, что наибольшее влияние температуры изотермического прогрева на прочность при сжатии в суточном возрасте наблюдается в составе, модифицированном добавкой реламикс Т-2 (состав № 3). Однако наибольшее значение прочности на сжатие в возрасте 1 и 28 сут у состава № 4 (прочность на сжатие увеличивается на 49 % в суточном и на 20 % в марочном возрасте по сравнению с составом № 3 при температуре изотермической выдержки 80 °С).

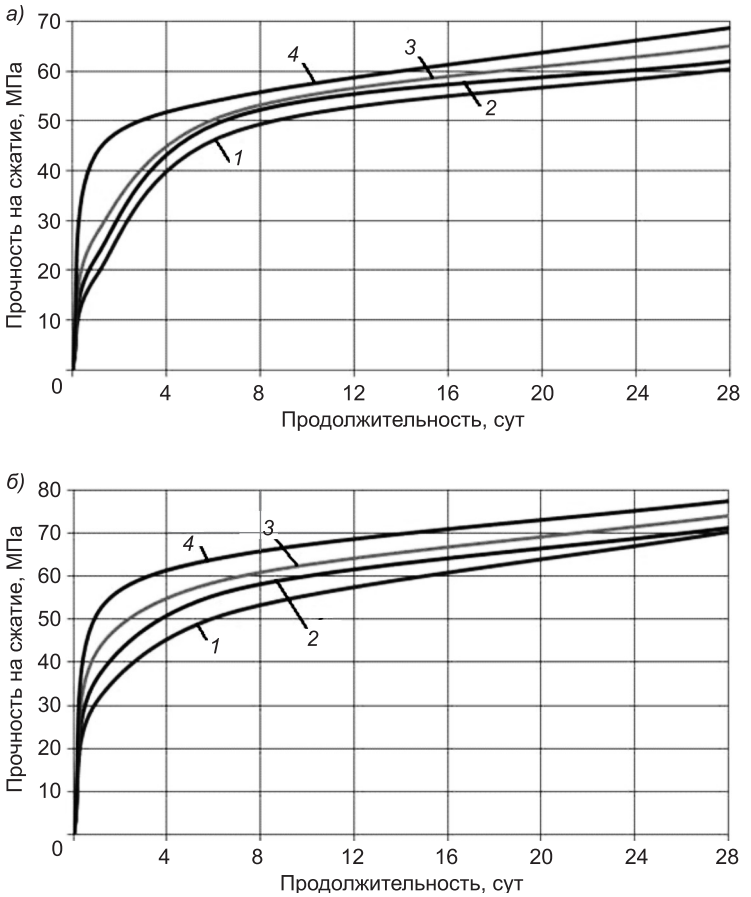


Рис. 2. Кинетика набора прочности тяжелого бетона состава № 3 (*а*) и состава № 4 (*б*)

Обозначение см. на рис. 1

Представленные данные позволили составить таблицу зависимости режима ТВО, времени твердения для получения заданного класса бетона состава № 4. Из таблицы видно, что для достижения заданного класса бетона можно увеличить температуру изотермического прогрева при одновременном снижении времени твердения. При этом, например, для достижения класса бетона В40 время твердения образцов сокращается на 6 сут, а для класса В50 — на 12 сут.

Зависимость температуры ТВО, времени твердения для получения заданного класса бетона состава № 4

Температура ТВО, °С	Время твердения, сут	Класс бетона по прочности
—	2	В30
30	1,5	
40	1	
—	7	В40
30	4	
40	2	
80	1	
—	22	В50
30	19	
40	14	
80	10	
80	28	В60

Резкое повышение прочности бетона связано с особенностями формирования гидратных новообразований. Для определения данных особенностей проведен РФА образцов цементного камня составов № 1–4 дифрактометром D2 Phaser (Брукер, Германия) для измерений порош-

ковых препаратов в геометрии Брега–Брентано с использованием монохроматизированного CuKα-излучения (λ = 1,54178 Å), в режиме шагового сканирования. Режимы измерений и регистрации составили: напряжение рентгеновской трубки 30 kV; ток 30 mA; шаг сканирования 0,02°; скорость 1 град/мин; диапазон углов сканирования в геометрии Брега–Брентано 3–60°.

Дифрактограммы по компьютерной базе данных сопоставлялись с эталонными. В качестве базы данных использовалась международная картотека порошковых рентгенографических стандартов PDF-2 ICDD.

На рис. 3 изображены дифрактограммы образцов в суточном возрасте, где по вертикальной оси обозначены бреговские углы в градусах, по горизонтальной оси — относительные дифракционные отражения минералов в импульсах в секунду.

Для эксперимента выбраны следующие составы:
№ 1 — контрольный; № 2 модифицирован добавкой реламикс Т-2;
№ 3 получен МХА вяжущего, модифицированного добавкой реламикс Т-2;
№ 4 получен МХА вяжущего, модифицированного добавкой реламикс Т-2, и подвергнут ТВО при температуре 80 °С.

По данным РФА видно, что наибольшее количество эттрингита образуется в составе № 1, а наименьшее — в составе № 4. Известно, что в насыщенном растворе $Ca(OH)_2$ эттрингит сначала выделяется в коллоидном тонкодисперсном состоянии, осаждаясь на поверхности частиц 3CaO–$A1_2O_3$, замедляет их гидратацию и продлевает схватывание цемента. Это подтверждают эксперименты по определению сроков схватывания цементного теста, в составе № 3 наблюдается замедление сроков схватывания по сравнению с составом № 4 (на 65 мин начало срока схватывания, на 100 мин конец срока).

Наименьшее содержание исходных минералов клинкера Ca_2SiO_4 α-Ca_2SiO_4 и Ca_3SiO_5 (алит и белит) и наибольшее количество гидросиликатов кальция (CSH) в составе № 4 свидетельствуют о более полной гидратации цемента, что подтверждается более высокой прочностью получаемого бетона.

В составах № 1 и 2 примерно одинаковое количество исходных минералов клинкера указывает на отсутствие замедления гидратации цемента в присутствии добавки реламикс Т-2.

Повышение содержания гидроксида кальция ($Ca(OH)_2$) в составе твердеющего камня, являющегося продуктом гидролиза клинкерных минералов, подтверждает ускорение гидратации цемента. Наибольшее содержание $Ca(OH)_2$ ярко выражено в составе № 4. По результатам количественного анализа получено, что содержание $Ca(OH)_2$ в составе № 4 больше в 2,6 раза по сравнению с составом № 3.

Выводы. 1. Изучено влияние температуры изотермического прогрева при ТВО на кинетику твердения тяжелого бетона, полученного МХА вяжущего. Прирост прочности на сжатие в первые сутки твердения повышается на 18, 34 и 65 % при температуре изотермического прогрева соответственно 30, 40 и 80 °С.

2. Повышение прочности на сжатие тяжелого бетона при МХА вяжущего в первые сутки твердения позволяет сократить сроки распалубки

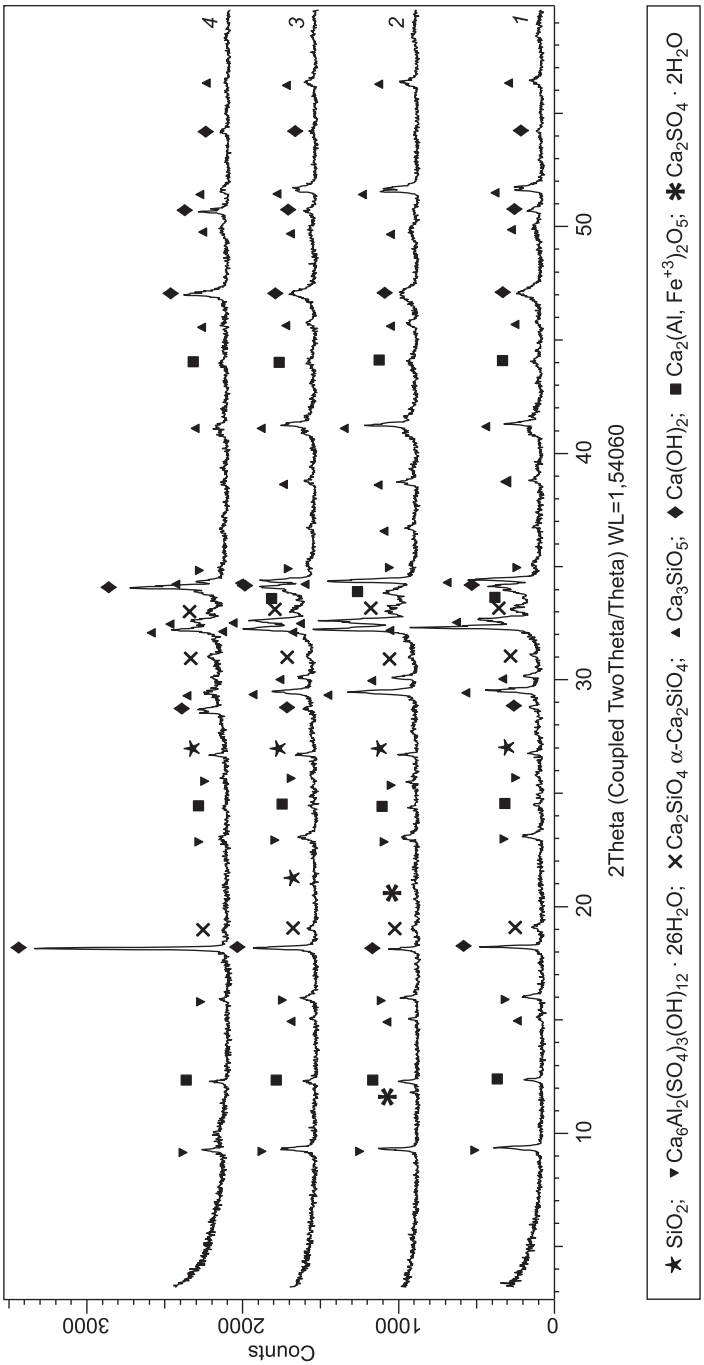


Рис. 3. Кривые РФА образцов цементного камня

1 — состав № 1 — контрольный; *2* — состав № 2 — с добавкой; *3* — состав № 3, подвергнутый МХА с добавкой; *4* — состав № 4, подвергнутый МХА с добавкой при ТВО

изделий или понизить температуру изотермического прогрева при сохранении сроков распалубки. В связи с этим разработана таблица, на которой показана зависимость температуры ТВО, времени твердения для достижения заданного класса бетона по прочности.

3. Определен состав и характер новообразований в цементном камне, полученном МХА вяжущего и твердеющем при ТВО в суточном возрасте. Показано, что повышение прочности на сжатие обусловливается пониженным количеством эттрингита, уменьшением содержания исходных фаз клинкера и повышенным содержанием гидросиликатов кальция (CSH), а также высокой концентрацией гидроксида кальция ($Ca(OH)_2$).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженов Ю.М. Технология бетона. М. : Изд-во АСВ, 2003. 500 с.
2. Изотов В.С., Ибрагимов Р.А. Комплексная добавка для модифицирования бетона // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 2. С. 38–42.
3. Тейлор Х. Химия цемента. М.: Мир, 1996. 560 с.
4. Intini G., Liberti L., Notarnicola M., Di Canio F. Mechanochemical activation of coal fly ash for production of high strength cement conglomerates // Химия в интересах устойчивого развития. 2009. Т. 17, № 6. С. 567–571.
5. Пименов С.И., Ибрагимов Р.А., Изотов В.С. Влияние гидромеханохимической активации цементной суспензии на физико-механические свойства тяжелого бетона // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 11. С. 16–21.

***Пименов Сергей Иванович**, асп.; E-mail: 3.14manon@mail.ru*
Казанский государственный архитектурно-строительный университет
***Ибрагимов Руслан Абдирашитович**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: rusmag007@yandex.ru*
Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 24.08.15

Pimenov Sergey Ivanovich, post-graduate student; E-mail: 3.14manon@mail.ru, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia
Ibragimov Ruslan Abdirashitovich, PhD, assistant professor; E-mail: rusmag007@yandex.ru, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

ESPECIALLY CEMENT HYDRATION AND KINETICS HARDENING HEAVY CONCRETE DEPENDING ON PARAMETERS OF HEAT AND HUMIDITY TREATMENT

The work is devoted to studying the effect of temperature isothermal heating at heat and humidity treatment (HHT) on the kinetics of heavy concrete curing, resulting in activation of the binder rotary pulsation apparatus. A comparative analysis of concrete samples after HHT with a temperature of isothermal holding 30, 40 and 80 °C. Shows how to obtain different concrete classes depending on temperature HHT, and mechanical activation cement slurry. The character of cement hydration at HHT subjected to mechanical activation.

Keywords: heat and humidity treatment, mechanochemical activation, heavy concrete.

REFERENCES

1. Bazhenov Yu.M. Tekhnologiya betona [Concrete Technology]. Moscow, Publishing House of the DIA, 2003, 500 p. (rus.)

2. Izotov V.S., Ibragimov R.A. Kompleksnaya dobavka dlya modifitsirovaniya betona [Complex additive for updating of concrete]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction], 2012, No. 2, pp. 38–42 (rus.)
3. Taylor X. Khimiya tsementa [Chemistry cement]. M., Mir, 1996, 560 p. (rus.)
4. Intini G., Liberti L., Notarnicola M., Di Canio F. Mechanochemical activation of coal fly ash for production of high strength cement conglomerates. Chemistry for Sustainable Development, 2009, T. 17, No. 6, pp. 567–571.
5. Pimenov S.I., Ibragimov R.A., Izotov V.S. Vliyanie gidromekhanokhimicheskoy aktivatsii tsementnoy suspenzii na fiziko-mekhanicheskie svoystva tyazhelogo betona [Influence hidromechanically activation of cement slurry on the physico-mechanical properties of heavy concrete]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction], 2014, No. 11, pp. 16–21 (rus.)

УДК 691.545

Г.И. ОВЧАРЕНКО, А.В. ВИКТОРОВ, М.П. ВЕСЕЛКОВА

СМЕШАННЫЙ ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТ НА ШЛАКАХ РАЗНОЙ ТОНКОСТИ ПОМОЛА

Прочность смешанных шлакопортландцементов на базе ЦЕМ I 42,5 Н (аналог ПЦ 500 Д0) или ЦЕМ II/А-Ш 32,5 (аналог ПЦ 400 Д20) и тонкоизмельченных до удельной поверхности 6800–7900 см^2/г доменных гранулированных шлаков Челябинского и Западно-Сибирского металлургических комбинатов в нормативные сроки твердения пропорциональна дисперсности шлаков и не зависит от тонкости их измельчения в ранние сроки твердения до 2–7 сут. При одинаковой дисперсности прочность шлакопортландцементов существенно зависит от дозировки шлака при нормальных условиях твердения и мало зависит при пропаривании. Для достижения 100 % прочности исходного портландцемента шлаки надо молоть до дисперсности не менее 6,0–6,5 тыс. см^2/г.

Ключевые слова: тонкоизмельченный доменный гранулированный шлак, смешанные цементы, эквивалентная прочность.

Обладающие скрытыми вяжущими свойствами доменные гранулированные шлаки (ДГШ) широко применяются в цементах и бетонах. На строительном рынке периодически возникают предложения по поставкам молотых ДГШ, обеспечивающих экономию портландцемента в бетонах. Последний вопрос наиболее актуален для строительства, так как часто заявленная эффективность молотых ДГШ не подтверждается на практике.

Исследование тонкомолотых ДГШ в смешанных цементах (смешанные шлакопортландцементы (ШПЦ)) представляет интерес и с позиций новой классификации активных минеральных добавок [1], так как ДГШ в ней выступает в качестве не только химически активной, но и структурно-активной минеральной добавки.

В данной работе использовались доменные гранулированные шлаки Западно-Сибирского (ЗСМК) и Челябинского металлургических комбинатов (ЧМК). Химический состав шлаков приведен в табл. 1, тонкость измельчения по ПСХ-2 и по остатку на сите № 008 — в табл. 2.

Таблица 1. **Химический состав доменных шлаков**

Шлак	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	FeO	S	TiO_2	Сумма	Кк	Ка
ЗСМК	37,7	15,8	34,6	10,9	0,82	0,50	0,52	—	100,82	1,56	0,42
ЧМК	40,3	10,1	37,2	10,3	0,82	0,28	0,67	—	99,6	1,41	0,25

В работе применялись портландцементы (ПЦ): без минеральных добавок, нормально твердеющий ЦЕМ I 42,5 Н (аналог ПЦ 500 Д0) и ПЦ с минеральными добавками быстротвердеющий ЦЕМ II/А-Ш 32,5 Б (аналог

© Овчаренко Г.И., Викторов А.В., Веселкова М.П., 2015

Таблица 2. **Характеристики тонкости измельчения шлаков**

ЗСМК		ЧМК	
Удельная поверхность, $S_{уд}$, см^2/г	Остаток на сите № 008, %	Удельная поверхность, $S_{уд}$, см^2/г	Остаток на сите № 008, %
1800	3,74	4800	Нет
2600	0,26	5300	Нет
4500	0,1	6800	Нет
7900	Нет		

Таблица 3. **Характеристика портландцементов**

Класс прочности	Остаток на сите № 008, %	Удельная поверхность, $S_{уд}$, см^2/г	Нормальная густота цементного теста, %	Сроки схватывания, ч и мин	Равномерность изменения объема
ЦЕМ I 42,5 Н	0,9	2700	26	3 ч 15 мин — 5 ч 15 мин	Выдержал
ЦЕМ II/А-Ш 32,5 Б	2,2	2200	28	1 ч 40 мин — 3 ч 20 мин	Выдержал

ПЦ 400 Д20) по ГОСТ 31108–2003 производства ОАО «Искитимцемент». Характеристики цементов приведены в табл. 3.

ДГШ ЗСМК в естественной гранулометрии (3–10 мм) размалывали в фарфоровой шаровой лабораторной мельнице до удельных поверхностей 1800, 2600, 4500 см^2/г, загружали в планетарную мельницу АГО-3 конструкции Института химии твердого тела и механохимии СО РАН, где он домалывался до удельной поверхности 7900 см^2/г. ДГШ ЧМК поставлялся с удельной поверхностью, равной 4800 см^2/г. Далее производился дополнительный его помол до удельных поверхностей 5300 см^2/г и 6800 см^2/г на планетарной мельнице АГО-2 конструкции той же организации.

Помолотые шлаки в количестве 10, 20, 30, 40 и 50 % добавлялись к портландцементам, смеси усреднялись в фарфоровой мельнице без дополнительного помола, готовилось тесто нормальной густоты, из теста формовались кубики размером 20×20×20 мм, которые испытывались на предел прочности при сжатии после различных сроков нормального твердения, а также после пропаривания по режиму 3+6+3 ч при температуре изотермической выдержки 60 °С. По полученным данным строились статистические математические модели.

Предложенный на рынке Сибири для заводов ЖБИ молотый шлак ЧМК исследовался в смеси с наиболее распространенным здесь цементом ЦЕМ II/А-Ш 32,5 или в старой маркировке ПЦ М400 Д20. Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Как видно из статистических моделей (рис. 1–4), в ранние сроки (7 сут нормального твердения (НТ)) прочность смешанного цемента не зависит от удельной поверхности шлака (для данного диапазона дисперсности), а зависит от его дозировки. При этом дозировка шлака с увеличением его удельной поверхности повышается в оптимальных составах от 20 до 30 %.

В ранние сроки нормального твердения доля вклада пуццолановой реакции активизации стеклофазы шлака гидролизной известью клинкера еще незначительна, тем более для ПЦ с активной минеральной добавкой в виде того же ДГШ.

Таблица 4. **Прочность смешанных цементов с добавлением ДГШ ЧМК**

Удельная поверхность $S_{уд}$, см²/г	Добавка шлака к ПЦ, %	Прочность, МПа			
		7 сут НУ	28 сут НУ	После ТВО	ТВО + 28 сут
4800	10	58,8	52,5	36,4	50,62
	20	47,06	53,9	26,1	42,52
	30	41,8	39,73	31,68	48,32
	40	43	48,45	33,5	44,5
	50	32,5	42,6	29,4	41,66
5300	10	61,9	53,8	50,07	65,8
	20	63,5	58,4	39,49	63,2
	30	58	52,6	36,13	54,4
	40	50,66	53,2	36,3	64,2
	50	43,76	55	38,23	62,5
6800	10	45,3	66,53	56,3	66,3
	20	48,85	63,77	63	70,5
	30	45,67	65,23	65,2	68,71
	40	42	58	64,75	69,3
	50	45,36	52,65	64,8	59,2

Поэтому в эти сроки твердения частицы шлака могут рассматриваться как гранулометрическая и структурно-активная добавка [1].

В нормативные сроки нормального твердения в 28 сут (см. рис. 2) прочность смешанных цементов увеличивается пропорционально тонкости измельчения шлака. Здесь доля вклада пуццолановой реакции активизации стекла шлака гидролизной известью клинкера значительна. При этом для получения прочности в 100 % от исходного ПЦ требуется измельчить шлак до поверхно-

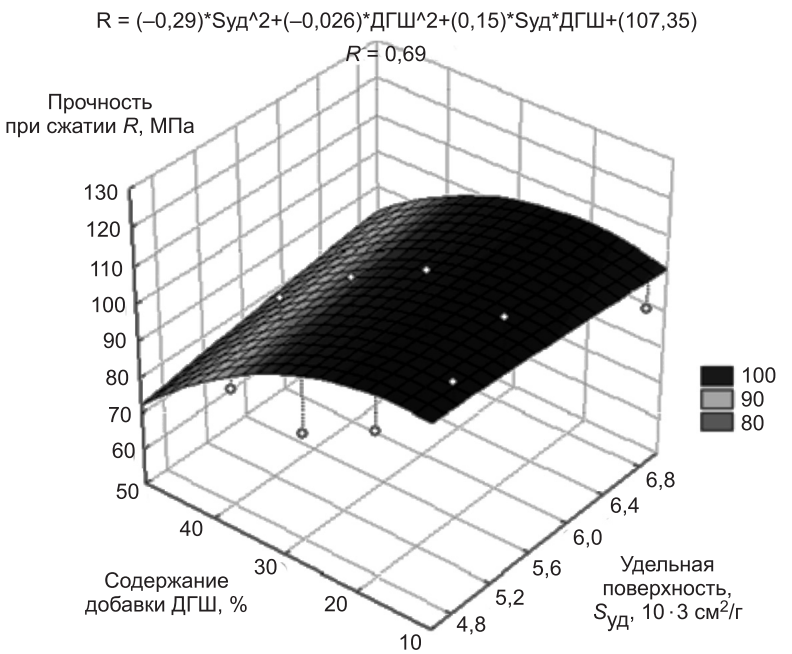


Рис. 1. Прочность смешанных цементов после 7 сут НТ (в процентах от прочности ПЦ без добавления шлака)

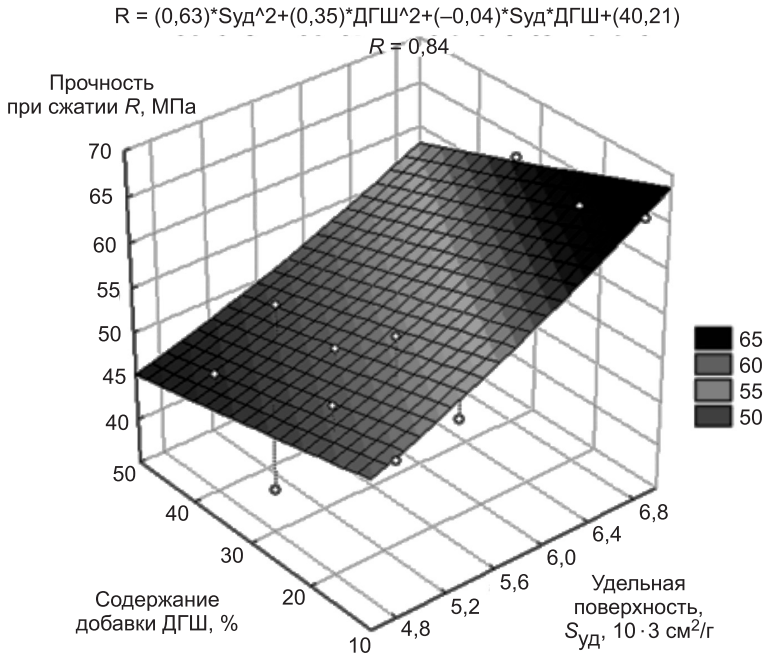


Рис. 2. Прочность смешанных цементов после 28 сут НТ. Прочность контрольного образца 55 МПа

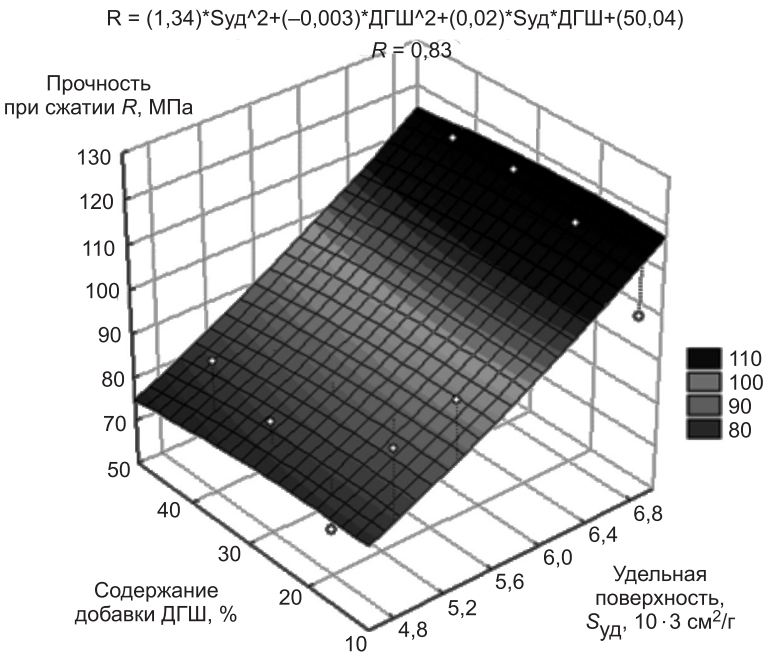


Рис. 3. Прочность смешанных цементов после ТВО (в процентах от прочности ПЦ без добавления шлака)

сти не менее 5200–5300 см^2/г при замене им 10–20 % ПЦ и не менее 6000 см^2/г для увеличения замены доли цемента шлаком более 20 %. Процент замены ПЦ шлаком существенно зависит от удельной поверхности последнего.

Пропаривание смешанных цементов увеличивает эффективность замены ПЦ шлаком, так как в этом случае активизация стекла шлака из-

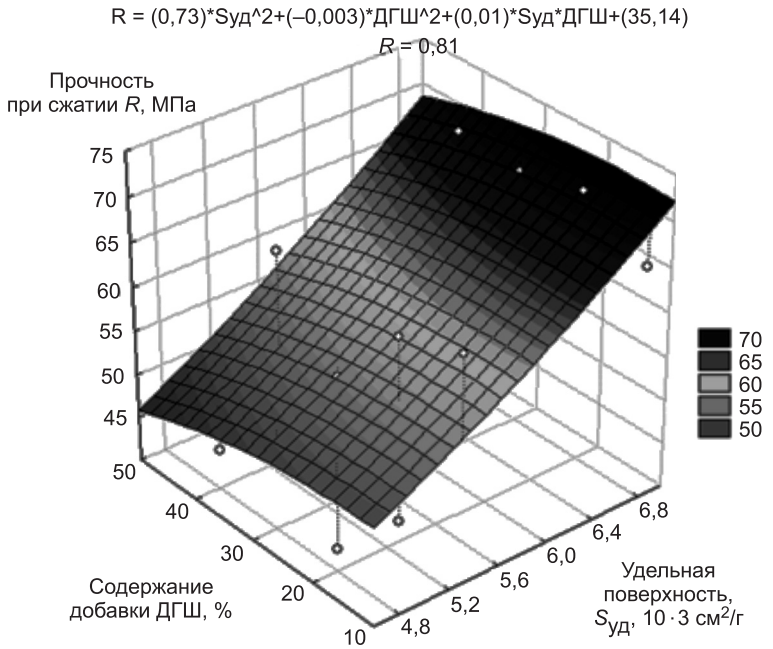


Рис. 4. Прочность смешанных цементов после ТВО и последующих 28 сут НТ. Прочность контрольного цемента 56 МПа

вестью усиливается. Здесь уже прочность меньше зависит от дозировки шлака, но более значительно от его тонкости измельчения (см. рис. 3, 4). Однако и в этом случае для обеспечения достижения смешанным цементом 100 % прочности исходного портландцемента шлак необходимо молоть до $S_{уд}$ = 5,8–6,0 тыс. см^2/г. Эти данные согласуются с результатами [2] по прочности смешанных ШПЦ из клинкера и шлака с разной дисперсностью.

Далее проводились исследования смешанных цементов на основе бездобавочного портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н (что и рекомендуется для ШПЦ) и доменного граншлака ЗСМК, размолотого в широком диапазоне изменения дисперсности от 1,8 до 7,9 тыс. см^2/г. Полученные результаты были аналогичны изложенным со шлаком ЧМК и ПЦ 400 Д20. Это объясняется тем, что использовали более активный цемент ПЦ 500 Д0, но и более инертный шлак ЗСМК. Отличия заключались лишь в том, что активность ШПЦ не зависела от дисперсности шлака только до 2 сут раннего твердения, а в 7 сут уже отмечалась зависимость прочности от удельной поверхности шлака. Кроме того, для достижения прочности ШПЦ, равной прочности исходного ПЦ, шлак ЗСМК необходимо молоть еще тоньше — до 6,3–6,5 тыс. см^2/г.

Выводы. 1. Прочность смешанных ШПЦ на базе ЦЕМ I 42,5 Н (аналог ПЦ 500 Д0) или ЦЕМ II/А-Ш 32,5 (аналог ПЦ 400 Д20) и тонкоизмельченных до удельной поверхности 6800–7900 см^2/г доменных гранулированных шлаков ЧМК и ЗСМК в нормативные сроки твердения пропорциональна дисперсности шлака, но не зависит от тонкости его измельчения в ранние сроки твердения до 2–7 сут.

2. При одинаковой дисперсности прочность ШПЦ существенно зависит от дозировки шлака при нормальных условиях твердения и мало зависит при пропаривании.

3. Для достижения 100 % прочности исходного ПЦ шлак надо молоть до дисперсности не менее 6,0–6,5 тыс. см^2/г.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Овчаренко Г.И., Аввакумов Е.Г., Песоцкий А.В., Викторов А.В., Садрашева А.О. Влияние вида тонкоизмельченных минеральных добавок на прочность цементного камня. Ч. 1 // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 12. С. 19–24.
2. Oner M., Erdogdu K., Gunlu A. Effect of components fineness on strength of blast furnace slag cement // Cement and Concrete Research. 2003. Vol. 33, Iss. 4. P. 463–469.

***Овчаренко Геннадий Иванович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: egogo1980@mail.ru*
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул
***Викторов Артем Владимирович**, асп.; E-mail: artem.viktorov2011@yandex.ru*
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул
***Веселкова Маргарита Петровна**, студ.*
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Получено 21.08.15

Ovcharenko Gennady Ivanovich, DSc, professor; E-mail: egogo1980@mail.ru, Altay State Technical University, Barnaul, Russia
Viktorov Artem Vladimirovich, post-graduate student; E-mail: artem.viktorov2011@yandex.ru, Altay State Technical University, Barnaul, Russia
Veselkova Margarita Petrovna, student, Altay State Technical University, Barnaul, Russia

MIXED SLAG PORTLANDTSEMENT ON SLAGS OF A DIFFERENT SUBTLETY OF A GRINDING

The strength of the mixed slag cements on the basis of CEM I 42,5 N (analogue PC 500 D0) or CEM II / A-SH 32.5 (analogue PC 400 D20) and finely ground to a specific surface of 6800–7900 sm^2/g of granulated blast slag of ChMK and ZSMK in normative terms proportional to the dispersion of slag, but does not depend on the fineness of their grinding in the early stages of hardening up to 2–7 days. With equal dispersion strength essentially depends on the dosage of the slag under normal curing conditions, and depends little by steaming. To achieve 100 % of the strength of initial cements, slags necessary to grind fineness of at least 6,0–6,5 th. sm^2/g.

Keywords: fine granulated blast slag, mixed cements, equivalent strength.

REFERENCES

1. Ovcharenko G.I., Avvakumov E.G., Pesotsky A.V., Viktorov A.V., Sadrasheva A.O. Vliyanie vida tonkoizmel'chennykh mineral'nykh dobavok na prochnost' tsementnogo kamnya. Chast' 1 [Effect of the type of finely grinding mineral additives on the strength of cement stone. Part 1]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction], 2014, No. 12, pp. 19–24 (rus.)
2. Oner M., Erdogdu K., Gunlu A. Effect of components fineness on strength of blast furnace slag cement. Cement and Concrete Research, 2003, Vol. 33, Iss. 4, pp. 463–469.

УДК 691.4 : 666.31

В.З. АБДРАХИМОВ, Е.Ю. НИКУЛИНА, Е.С. АБДРАХИМОВА

ИННОВАЦИОННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ОТХОДОВ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В ПРОИЗВОДСТВЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ*

Получены керамические теплоизоляционные материалы на основе отходов топливно-энергетического комплекса без применения природного традиционного сырья. Исследуемые отходы имеют повышенную теплоту сгорания, поэтому их целесообразно использовать не только в качестве отощителей, но и в качестве выгорающих добавок, что позволит исключить применение в составах керамических масс антрацита, коксовой мелочи и др. Выгорающие добавки повышают пористость керамических изделий и способствуют равномерному спеканию керамического черепка. Использование отходов топливно-энергетического комплекса в производстве керамических материалов способствует утилизации промышленных отходов, охране окружающей среды и расширению сырьевой базы для строительных материалов.

Ключевые слова: отходы топливно-энергетического комплекса, теплоизоляционные материалы, выгорающие добавки, утилизация отходов, химический состав, физико-механические показатели.

Введение. Топливно-электроэнергетический комплекс является одним из основных «загрязнителей» окружающей природной среды. Это выбросы в атмосферу (48 % выбросов в атмосферу), сбросы сточных вод (36 % сбросов), а также образование твердых отходов (30 % твердых загрязнителей) [1]. К отходам топливно-энергетической промышленности относятся продукты, получаемые в виде отходов при добыче, обогащении и сжигании твердого топлива [2]. Эту группу отходов разделяют по источнику образования, виду топлива, числу пластичности минеральной части отходов, содержанию горючей части, зерновому и химико-минералогическому составу, степени плавкости, интервалу размягчения, степени вспучиваемости и т.д.

В настоящее время эффективность работы всех отраслей промышленности необходимо оценивать с точки зрения баланса между массой основного продукта и объемом образуемых техногенных отходов. Наиболее неблагополучны в этом плане предприятия топливно-энергетического комплекса, а именно тепловые электрические станции (ТЭС), являющиеся источниками массированных атмосферных выбросов и крупнотоннажных твердых отходов на обогатительных предприятиях.

* Работа выполнена по гранту на тему «Физико-химические процессы и процессы горения при синтезе керамических композиционных теплоизоляционных материалов на основе отходов топливно-энергетического комплекса» в рамках программы «Фундаментальные научные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук и Министерства строительства».

© Абдрахимов В.З., Никулина Е.Ю., Абдрахимова Е.С., 2015

Длительное хранение отходов теплоэнергетики в золоотвалах приводит к попаданию в воду и почву вредных веществ и ионов тяжелых металлов. По оценкам автора работы [3], антропогенная составляющая формирования качества поверхности вод уже соизмерима с природной составляющей, что представляет угрозу устойчивому водопользованию. Совершенно очевидно, что нужно снижать антропогенную нагрузку посредством внедрения региональных нормативов, изменения платы за загрязнение водных объектов и использования отходов энергетики в производстве строительных материалов.

Производство керамических материалов — одна из самых материалоемких отраслей народного хозяйства, поэтому рациональное использование топлива, сырья и других материальных ресурсов становится решающим фактором ее успешного развития в условиях проводимой экономической реформы [4, 5]. В связи с этим применение в керамических материалах отходов сырья приобретает особую актуальность. Кроме того, около 70 % золошлаковых материалов и отходов углеобогащения имеют повышенное содержание как несгоревших, так и необогащенных остатков горючей части, что значительно сокращает потребность в топливе при обжиге керамических материалов [6].

Около 66 % зол, образующихся при сжигании тощих углей, имеют повышенное содержание несгоревших остатков [6, 7]. Суммарное содержание подобных остатков может удовлетворить потребность в топливе всей керамической промышленности по производству кирпича, а минеральная часть золы — заменить до трети потребности в глиняном сырье[1].

Отходы топливно-энергетического комплекса целесообразно использовать в керамических изделиях в качестве отощителей и выгорающих добавок. *Отощающие добавки* вводят для уменьшения пластичности глин и, следовательно, линейной усадки при сушке и обжиге за счет меньшей водопотребности глиняного теста, а также снижения чувствительности к сушке сырца. *Выгорающие добавки* вводят для получения изделий с меньшей средней плотностью и повышенной пористостью.

Одной из актуальных задач промышленности стеновой керамики является производство изделий для несущих и ограждающих конструкций с классом по средней плотности не более 1200 кг/м^3, которые по теплотехническим характеристикам относятся к группам изделий высокой эффективности с теплопроводностью не более 0,20 Вт/(м · °С)[2, 3].

Цель работы: получение керамических материалов различного направления на основе отходов топливно-энергетического комплекса без применения природных традиционных материалов.

---

[1] Иванов И.А., Калашников И.Г. Опыт изготовления глинозольного кирпича полусухого прессования // Строит. материалы. 1976. № 4. С. 21–24.

[2] Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Экологические и практические аспекты использования шлака от сжигания угля в производстве керамических материалов на основе межсланцевой глины // Уголь. 2014. № 4. С. 41–43.

[3] Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Использование отходов углеобогащения в производстве теплоизоляционных материалов // Химия твердого топлива. 2012. № 2. С. 67–73.

Сырьевые материалы. В настоящей работе нами исследованы 15 наиболее представительных видов отходов топливно-энергетического комплекса. Известно, что в угледобывающей промышленности при добыче угля открытым способом на 1 т добытого угля приходится 4–5 т отходов [1].

Химический состав — важнейшая характеристика сырьевых материалов — в значительной мере определяет их пригодность для производства изделий различных видов. В табл. 1 и 2 приведены химические составы (оксидный и поэлементный) исследуемых отходов топливно-энергетического комплекса. Поэлементный химический состав, проведенный с помощью электронного растрового сканирующего микроскопа Philips 525M, показывает наличие углерода. Фракционный состав компонентов представлен в табл. 3, а технологические показатели компонентов — в табл. 4 и 5.

Таблица 1. **Оксидный химический состав компонентов**

Компонент	Содержание оксидов, мас. %						
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	R_2O	П.п.п.
В качестве глинистого компонента							
Межсланцевая глина	45–47	13–14	5–6	11–13	2–3	3–4	9–20
В качестве отощителей и выгорающих добавок							
Золошлаковый материал Тольяттинской ТЭС	48–49	16–17	7–8	3–4	2–3	0,1–0,3	20–21
Золошлаковая смесь от сжигания горючих сланцев	35–37	10–11	7,5–10	20–23	2–2,5	2–3	14–19
Отходы флотации углеобогащения ГОФ «Томусинская»	53–54	18–19	6-7	1–2	0,3–0,7	4–5	16–17
Шламы флотационного углеобогащения ЦОФ «Обуховская»	35–36	14–15	5–6	1–2	1–1,5	1–1,5	33–34
Отходы углеобогащения ЦОФ «Абашевская»	54–55	16–175	3–4	5–6	1,5–2	3–4	13–14
Отходы углеобогащения Коркинского разреза	43–44	17–18,5	5–6	3–4	2–3	2–3	19–20
Горелые породы	39–40	12–13	7–8	19–19,5	2–3,5	0,5–1	14–16
Нефтяной шлам Самарской области	21–22	8–10	8–10	24–27	1–2	1–2	30–32
Буровой шлам Оренбургской области	26–28	4–5	5–6	28–30	1–2	0,5–1	33–35
В качестве отощителей							
Золошлаковый материал Барнаульской ТЭС-1	49–52	25–27	9–10,5	7–8	2–3	0,5–1,5	9–9,5
Золошлаковый материал Усть-Каменогорской ТЭЦ	29–31	17–19	4–6	3–5	2–2,5	2–3	10–11,5
Глиежи (горелые породы) шахты «Зиминка»	61–63	19–21	5–6	6–7	2–2,5	0,5–2	1–2
В качестве отощителей, плавней и интенсификаторов спекания							
Зола легкой фракции	58–59	21–22	5–5,5	3–4	1–1,5	8–9	0,5–1
Шлак Красноярской ТЭЦ-2	54–55	5–7	9–10	22–24	3–3,5	3–3,5	0,2–0,5

Таблица 2. **Поэлементный химический анализ компонентов**

Компонент	C	O	Na	Mg	Al + Ti	Si	S	K	Ca	Fe
В качестве глинистого компонента										
Межсланцевая глина	5,73	51,06	0,46	1,04	7,20	18,66	1,83	1,75	10,53	3,35
В качестве отощителей и выгорающих добавок										
Буровой шлам Оренбургской области	17,08	37,92	0,94	0,83	6,18	10,38	1,87	0,92	19,08	4,08
Нефтяной шлам Самарской области	16,02	41,93	0,83	0,87	5,14	5,49	2,10	0,89	22,58	4,15
Отходы флотации углеобогащения ГОФ «Томусинская»	8,88	53,19	—	—	11,64+0,29	19,02	0,28	2,39	0,35	3,96
Шламы флотационного углеобогащения (угольные шламы ЦОФ «Обуховская»)	8,84	55,19	—	—	9,64+0,29	19,03	0,28	2,39	0,38	3,88
Отходы углеобогащения Коркинского разреза	8,80	57,17	1,78	1,05	11,34+0,19	16,03	0,11	—	0,53	3,87
Золошлаковая смесь от сжигания горючих сланцев	7,44	47,38	0,81	0,93	5,65	16,9	1,58	1,53	12,2	5,58
Горелые породы	7,32	53,94	0,37	0,61	9,65	15,15	2,87	0,76	8,46	1,17
Золошлаковый материал Тольяттинской ТЭС	6,4	51,08	1,09	0,40	10,5+1,44	18,44	1,1	1,5	3,03	4,02
Отходы углеобогащения ЦОФ «Абашевская»	6,2	52,92	0,44	0,2	11,58	19,5	0,1	1,71	4,5	2,85
В качестве отощителей										
Золошлаковый материал Барнаульской ТЭС-1	3,3	44,7	0,98	0,43	15,8	23,8	0,4	0,89	4,3	5,4
Золошлаковый материал Усть-Каменогорской ТЭЦ	4,2	55,17	0,78	0,45	14,4	25,7	0,3	0,74	3,9	4,7
Глиежи (горелые породы) шахты «Зиминка»	0,5	51,55	0,32	0,33	11,8	27,9	0,1	0,3	3,8	3,4
В качестве отощителей, плавней и интенсификаторов спекания										
Зола легкой фракции	0,14	50,30	3,82	0,82	12,9+0,87	23,78	—	3,87	1,2	2,3
Шлак Красноярской ТЭЦ-2	—	52,5	0,78	2,12	4,5	18,4	—	0,5	15,4	5,8

Межсланцевая глина образуется при добыче горючих сланцев на сланцеперерабатывающих заводах (на шахтах)[4, 5] и является отходом производства. По числу пластичности она относится к высокопластичному глинистому сырью (число пластичности 27–32) с истинной плотностью 2,55–2,62 г/см^3. Минералогический состав межсланцевых глин разнообразен, однако общим

[4] Пат. 2483042 Российская Федерация, МПК C04B 33/135. Керамическая композиция для изготовления легковесного кирпича / А.В. Колпаков, В.З. Абдрахимов, Е.С. Абдрахимова; заявл. 14.12.2011; опубл. 27.05.2013; Бюл. № 15.

[5] Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. К вопросу о фазовых превращениях на различных этапах обжига керамического теплоизоляционного материала из межсланцевой и бейделлитовой глин // Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук. 2011. Т. 13, № 6. С. 220–232.

Таблица 3. **Фракционный состав компонентов**

Компонент	Содержание фракций, %, размер частиц, мм				
	>0,063	0,063–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,0001
В качестве глинистого компонента					
Межсланцевая глина	5	7	12	14	62
В качестве отощителей и выгорающих добавок					
Буровой шлам Оренбургской области	12,1	12,8	15,1	21,3	38,7
Нефтяной шлам Самарской области	13,5	14,3	14,8	20,1	37,4
Отходы флотации углеобогащения ГОФ «Томусинская»	35	27,1	6,7	12,8	18,4
Шламы флотационного углеобогащения (угольные шламы ЦОФ «Обуховская»)	37,8	24,2	7,1	13,2	17,7
Отходы углеобогащения Коркинского разреза	52,1	9,8	8,5	12,8	16,8
Золошлаковая смесь от сжигания горючих сланцев	16,84	33,41	32,49	12,68	4,58
Горелые породы	19,05	33,08	32,2	11,78	3,89
Золошлаковый материал Тольяттинской ТЭС	18,39	33,70	33,8	10,7	3,41
Отходы углеобогащения ЦОФ «Абашевская»	38,8	27,1	8,2	11,3	14,6
В качестве отощителей					
Золошлаковый материал Барнаульской ТЭС-1	15,2	34,1	34,7	11,48	4,51
Золошлаковый материал Усть-Каменогорской ТЭЦ	14,4	32,2	35,8	12,4	5,2
Глиежи (горелые породы) шахты «Зиминка»	24,8	36,84	32,9	3,76	1,7
В качестве отощителей, плавней и интенсификаторов спекания					
Зола легкой фракции (угли Кузбасского бассейна)	18,4	35,3	30,4	12,4	3,5
Шлак Красноярской ТЭЦ-2	17,9	34,9	31,30	13,5	2,6

для них является наличие кремнезема, гидрослюды, монтмориллонита и кальцита. Глинистые минералы в межсланцевой глине в основном представлены монтмориллонитом с примесью гидрослюды.

Золошлаковый материал Тольяттинской ТЭС использовался в керамических материалах в качестве отощителей и выгорающих добавок[6–8].

[6] Пат. 2346908 Российская Федерация, МПК С04В 33/132. Керамическая масса для изготовления керамического кирпича / И.В. Ковков, В.В. Шевандо, В.З. Абдрахимов, Д.Ю. Денисов, Е.С. Абдрахимова, А.В. Абдрахимов, Е.В. Вдовина; заявл. 09.01.2007; опубл. 20.02.2009; Бюл. № 5.

[7] Пат. 2354626 Российская Федерация, МПК С04В 33/135. Керамическая масса для изготовления керамического кирпича / Е.С. Абдрахимова, Е.В. Вдовина, В.З. Абдрахимов, А.В. Абдрахимов, В.И. Кожевников; заявл. 13.06.2007; опубл. 10.05.2009; Бюл. № 13.

[8] Пат. 2508269 Российская Федерация, МПК С04В 33/135. Керамическая композиция для изготовления легковесного кирпича / Е.С. Абдрахимова, И.Ю. Рощупкина, А.В. Колпаков, В.З. Абдрахимов; заявл. 11.01.2012; опубл. 20.07.2013; Бюл. № 20.

Таблица 4. **Технологические показатели компонентов**

Компонент	Теплота сгорания, кДж/кг	Огнеупорность, °С		
		начало деформации	размягчение	жидкоплавкое состояние
Межсланцевая глина	4609	1260	1290	1320
Буровой шлам Оренбургской области	14 665	1800	1240	1270
Нефтяной шлам Самарской области	13 827	1850	1280	1290
Отходы флотации углеобогащения ГОФ «Томусинская»	11 313	1220	1260	1300
Шламы флотационного углеобогащения (угольные шламы ЦОФ «Обуховская»)	11 732	1250	1300	1350
Отходы углеобогащения Коркинского разреза	10 475	1260	1300	1320
Золошлаковая смесь от сжигания горючих сланцев	8380	1300	1340	1380
Горелые породы	7961	1260	1290	1310
Золошлаковый материал Тольяттинской ТЭС	7542	1300	1350	1370
Отходы углеобогащения ЦОФ «Абашевская»	7542	1230	1270	1300

Минералогический состав золошлакового материала представлен следующими минералами, мас. %: аморфизованное глинистое вещество 10–20; органика 20–25; стекловатые шарики 45–65; кварц, полевой шпат 5–15; кальцит 3–5; гидрогранаты, муллит, оксиды железа 5–10; примеси 3–7. Имея повышенное содержание органики, золошлаковый материал может применяться в производстве керамических материалов и в качестве выгорающей добавки.

Золошлаковая смесь от сжигания горючих сланцев, как и золошлаковый материал, использовалась в керамических материалах в качестве отощителей и выгорающих добавок[9–12].

Процесс образования золошлаковой смеси происходит по следующей технологии: сланец с шахт Кашпирского рудника доставляется на Сызранскую ТЭС, загружается в приемные бункеры и ленточными питателями подается в молотковые дробилки на первую стадию измельчения. Полученная крупа (размер зерен до 15 мм) поступает в шахтные мельницы на вторую стадию измельчения. Потоком воздуха тонкий порошок через специальную

[9] Пат. 2440317 Российская Федерация, МПК С04В 33/135. Керамическая масса для изготовления кирпича / В.З. Абдрахимов; заявл. 05.07.2010; опубл. 20.01.2012; Бюл. № 2.

[10] Пат. 2555971 Российская Федерация, МПК С04В 33/132. Керамическая композиция для изготовления легковесного кирпича / В.З. Абдрахимов, Е.С. Абдрахимова; заявл. 28.03.2014; опубл. 10.07.2015; Бюл. № 19.

[11] Пат. 2550167 Российская Федерация, МПК С04В 33/132. Керамическая масса для изготовления керамического кирпича / В.З. Абдрахимов, Е.С. Абдрахимова; заявл. 25.02.2014; опубл. 10.05.2015; Бюл. № 13.

[12] Пат. 2478084 Российская Федерация, МПК С04В 14/24. Композиция для производства водостойкого пористого заполнителя / В.З. Абдрахимов; заявл. 01.07.2011; опубл. 27.03.2013; Бюл. № 9.

Таблица 5. **Технологические показатели отощителей, плавней, интенсификаторов спекания**

Компонент	Насыпная плотность, кг/м^3	Истинная плотность, г/см^3	Содержание стеклофазы, %	Удельная поверхность, см^2/г	Огнеупорность, °С
В качестве отощителя					
Золошлаковый материал Барнаульской ТЭС-1	700–800	2,6–2,7	50–60	1700–2000	1380
Золошлаковый материал Усть-Каменогорской ТЭЦ	750–850	2,65–2,75	50–60	1750–2000	1380
Глиежи (горелые породы) шахты «Зиминка»	600–700	2,75–2,83	40–60	1600–1700	1310
В качестве плавня и интенсификатора спекания					
Зола легкой фракции (угли Кузбасского бассейна)	350–500	2,53–2,6	80–90	2700–3000	1150
Шлак Красноярской ТЭЦ-2	600–700	2,68–2,75	70–80	1900–2500	1300

форсунку вдувается в топку паровых водотрубных котлов. В топке начинается термическая обработка сланцев. В газоходах и пылеосадительных устройствах происходит естественное фракционирование золы. Крупные частицы оседают в топке (25 %), средние — в экономайзере (5 %), мультициклонах (35 %), а самые легкие — в электрофильтрах (30 %).

В настоящей работе использовались отходы флотации углеобогащения ГОФ «Томусинская» (Кузнецкий бассейн, Кузбасс)[13–15]. Отходы флотации углеобогащения представляют собой глинисто-угольные суспензии. Петрографический анализ показал, что состав твердой фазы отходов флотации колеблется в зависимости от месторождения в следующих пределах, мас. %: органическая часть угля 6–24; пирит 4,4–9,4; карбонат 4,0–8,2; глинистое вещество 58–80 и кварц 4–7.

Угольные шламы ЦОФ «Обуховская» малосернистые по сравнению с другими отходами энергетики. Содержание угольной составляющей может достигать 40 %, минеральная часть представлена в основном гидрослюдой, кварцем, полевыми шпатами и слюдой. Органическая часть шламов флотационного углеобогащения состоит в большей степени из антрацита, за счет чего в них мало летучих компонентов и поэтому они трудно воспламеняются и горят коротким пламенем (температура обжига керамических изделий должна быть не менее 1050 °С)[16].

[13] Пат. 2362749 Российская Федерация, МПК С1 С04В 14/24. Композиция для производства пористого заполнителя / Д.Ю. Денисов, И.В. Ковков, В.З. Абдрахимов, Л.В. Журавель; заявл. 13.12.2007; опубл. 27.07.2009; Бюл. № 21.

[14] Пат. 2481286 Российская Федерация, МПК С1 С04В 14/24. Композиция для производства водостойкого пористого заполнителя / В.З. Абдрахимов, В.К. Семенычев, Е.С. Абдрахимова, Е.В. Вдовина; заявл. 29.06.2011; опубл. 10.05.2013; Бюл. № 13.

[15] Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Влияние отходов углеобогащения на структуру пористости легковесного кирпича // Кокс и химия. 2011. № 7. С. 43–46.

[16] Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Свойства конструкционно-изоляционных керамических материалов из смеси межсланцевой глины и отходов флотационного обогащения антрацитов // Химия твердого топлива. 2014. № 5. С. 30–34.

Отходы углеобогащения ЦОФ «Абашевская» (г. Новокузнецк) представлены сланцами аргиллито-алевролитового состава с прослойками песчаников (см. табл. 1–4). Отходы углеобогащения Коркинского разреза (Челябинская область), которые сложены аргеллитами, алевролитами, углистыми аргиллитами и сланцами, целесообразно использовать в качестве отощителей и выгорающих добавок[17].

Горелые породы образуются в местах добычи сланцев. Сланец, который не удалось в процессе добычи отделить от пустой породы, направляется в отвал. В терриконах при совместном хранении пустых пород и сланцев за счет повышенного количества органических соединений происходит самовозгорание, которое приводит к образованию большого количества горелых пород[18, 19]. Горелые породы представляют собой продукт низкотемпературного обжига при самовозгорании породы (смесь глины и сланцев) в терриконах в окислительной среде. Количество горелых пород в терриконах составляет от 75 до 90 % от объема отвала. По основным физическим и химическим свойствам они близки к глинам, обожженным при 800–1000 °С.

Самарская область является регионом развитой нефтеперерабатывающей промышленности. Несмотря на то что технологии нефтедобычи и нефтепереработки постоянно совершенствуются, они пока не достигли уровня безотходного производства. Поэтому, учитывая большое образование отходов нефтедобычи и негативное влияние их на биосферу, разработка новых методов их утилизации является весьма актуальной проблемой[20–23].

Буровой шлам — водная суспензия, твердая часть которой состоит из продуктов разрушения горных пород забоя и стенок скважины, продуктов истирания бурового снаряда и обсадных труб, глинистых минералов (при промывке глинистым раствором). Буровые отходы условно можно разделить на амбарную жидкость и буровой шлам. Хранение выбуренных отходов на кустовых площадках производится в шламовых амбарах. Буровой

[17] Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. К вопросу об экономической и экологической целесообразности использования отходов углеобогащения углистых аргиллитов в производстве теплоизоляционных материалов на основе межсланцевой глины // Экологические системы и приборы. 2014. № 1. С. 35–42.

[18] Пат. 2440950 Российская Федерация, МПК C1 C04B 33/138. Керамическая масса полусухого прессования для изготовления кирпича / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов; заявл. 19.05.2010; опубл. 27.01.2012; Бюл. № 3.

[19] Колпаков А.В., Абдрахимов В.З., Кайракбаев А.К. Исследование влияния горелых пород в производстве теплоизоляционного кирпича на механические свойства методом линейной регрессии // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 9–10. С. 22–28.

[20] Михеев В.А., Абдрахимов В.З. Влияние нефтяных отходов на структуру пористости теплоизоляционного материала // Огнеупоры и техническая керамика. 2011. № 7–8. С. 51–59.

[21] Пат. 2433972 Российская Федерация, МПК C1 C04B 14/24. Композиция для производства пористого заполнителя / В.З. Абдрахимов, В.К. Семенычев, В.А. Куликов, Е.С. Абдрахимова; заявл. 27.04.2010; опубл. 20.11.2011; Бюл. № 32.

[22] Пат. 2455248 Российская Федерация, МПК C2 C04B 14/12. Композиция для производства пористого заполнителя / И.В. Ковков, Л.В. Журавель, В.А. Куликов, В.З. Абдрахимов; заявл. 22.03.2010; опубл. 10.07.2012; Бюл. № 19.

[23] Пат. 2493119 Российская Федерация, МПК C2 C04B 14/12. Керамическая композиция для производства пористого заполнителя / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов; заявл. 22.03.2012; опубл. 20.09.2013; Бюл. № 26.

шлам состоит из выбуренных пород, в основном глины, песка, других пород, встречающихся в конкретной местности, и затвердевших составляющих амбарной жидкости, образуя «дно» шламового амбара. В амбарной жидкости содержатся нефтепродукты, буровые растворы и вода, привнесенная атмосферными осадками и другими источниками.

В качестве отощителя использовался золошлаковый материал Барнаульской ТЭС-1. Золошлаковый материал Усть-Каменогорской ТЭЦ получается от сжигания новокузнецких углей, его целесообразно использовать в производстве керамических материалов в качестве отощителей (см. табл. 1–3, 5).

Глиежи — обожженные породы, которые образуются вследствие природного выгорания угольных пластов или горения породных отвалов (терриконов). Состав и свойства горелых пород весьма изменчивы и зависят от состава исходных пород и степени их обжига. В зависимости от температуры обжига изменение пород проявляется в покраснении, ошлаковании и полном переплавлении. Площади развития зон иногда достигают десятков квадратных километров. Например, объем горелых пород на Абанском месторождении Канско-Ачинского бассейна 1,6 млрд м^3, а площади отдельных участков выгорания 20 км^2. В настоящей работе использовались глиежи шахты «Зиминка» (см. табл. 1–3, 5).

Зола легкой фракции, ее состав и свойства изучались в золоотвале № 2 Усть-Каменогорской ТЭЦ (угли Кузбасского бассейна). Площадь действующего золоотвала 25,0 га. Зола гидроудаления Усть-Каменогорской ТЭЦ получается в результате пылевидного сжигания углей в котлах.

Зола легкой фракции образуется на периферии золоотвала.

Количественный минералогический состав золы легкой фракции представлен следующими минералами, мас. %: стекловидные частицы 50–55, стекло 20–25, кварц 8–12, гематит 4–5, анортит 3–5, полевой шпат 5–8, муллит 2–4. Наличие муллита ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) в исследуемой золе легкой фракции будет способствовать образованию муллита при обжиге керамического кирпича. Золу легкой фракции в производстве керамических материалов целесообразно применять в качестве интенсификатора спекания для снижения температуры обжига[24, 25].

В качестве плавня и интенсификатора спекания для производства керамических материалов использовался шлак от сжигания угля Канско-Ачинского бассейна на Красноярской ТЭЦ-2[26, 27].

---

[24] Абдрахимов В.З. Образование золы легкой фракции и перспектива ее использования в производстве керамических плиток // Комплексное использование минерального сырья. 1988. № 6. С. 75–78.

[25] Абдрахимов В.З. Влияние золы легкой фракции на физико-механические свойства керамической плитки // Комплексное использование минерального сырья. 1988. № 7. С. 75–80.

[26] Пат. 2555973 Российская Федерация, МПК C1 C04B 33/135. Керамическая композиция для изготовления кирпича / В.З. Абдрахимов, Г.Р. Хасаев, Е.С. Абдрахимова, А.И. Ларионов, А.Г. Власов, А.В. Балановская; заявл. 28.03.2014; опубл. 10.07.2015; Бюл. № 19.

[27] Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Использование шлака от сжигания угля Канско-Ачинского бассейна в производстве керамических материалов на основе межсланцевой глины // Экология и промышленность России. 2014. № 3. С. 36–39.

Исследования минералогического состава шлака показали, что кристаллическая фаза в нем присутствует в незначительных количествах (не более 8–10 %). Аморфная фаза составляет порядка 60–80 %. $N_{ср}$ аморфной фазы равна 1,56–1,60, что, очевидно, связано с переходом части оксида железа в стекло и образование железистых стекол.

Экспериментальная часть. Компоненты предварительно измельчались до размера не более 5 мм, затем высушивались и тщательно перемешивались. Высушенная шихта до влажности не более 5 % измельчалась до прохождения сквозь сито 1,0 мм. Керамическую массу готовили пластическим способом при влажности 20–24 % (в зависимости от содержания глинистого компонента) и формовали кирпич. Кирпич-сырец высушивали до влажности не более 8 % и затем обжигали при температурах 1000–1050 °С (в зависимости от состава). Изотермическая выдержка при конечной температуре составляла 60 мин.

Исследованиями установлено, что отходы топливно-энергетического комплекса, содержащие 60–75 % Al_2O_3 + SiO_2, с небольшим количеством (до 7–10 %) CaO + MgO можно отнести к 1-му классу. Они пригодны в качестве керамического сырья [6, 7].

Отходы топливно-энергетического комплекса, содержащие 40–60 % Al_2O_3 + SiO_2 и 11–20 % CaO + MgO, относятся ко 2-му классу и могут применяться при производстве строительных материалов на основе высококачественных глин.

К 3-му классу относятся отходы топливно-энергетического комплекса с содержанием Al_2O_3 + SiO_2 до 40 % и CaO + MgO более 20 %, они малопригодны для производства керамических изделий.

Отходы топливно-энергетического комплекса, содержащие 10–20 % органических веществ, целесообразно вводить в шихту в объеме 20–25 %. Большое их количество приводит к увеличению пористости в изделиях после обжига, что снижает их прочность и морозостойкость.

При содержании органики 20–30 % положительный эффект достигается добавкой в шихту 12–20 % отходов топливно-энергетического комплекса, более 30 — 8–12 %. В этих случаях отходы могут заменять вводимый в шихту уголь, создавать восстановительную среду в толще обжигаемого материала и при достаточном количестве в глинистом сырье оксидов железа (более 3–5 % Fe_2O_3) переводить их в закисные соединения, интенсифицируя процесс обжига.

Органические вещества, например, в зольных материалах существенно отличаются от таковых в исходном материале и представлены коксом и полукоксом. Недожог угля присутствует либо в виде самостоятельных органических частиц, либо в виде включений в агрегатах, образованных разными фазами.

Строительный легковесный кирпич подразделяют в зависимости от плотности на три класса, кг/м^3: А — от 700 до 1000; Б — от 1000 до 1300; В — от 1300 до 1450.

Использование отходов топливно-энергетического комплекса, представленных в табл. 4, в количестве от 12 до 20 % на основе межсланцевой глины позволяет получить легковесный кирпич класса А и класса Б.

Исследуемые отходы имеют повышенную теплоту сгорания, поэтому они целесообразны не только в качестве отощителей, но и в качестве выгорающих добавок, что позволит исключить использование в составах керамических масс антрацита, коксовой мелочи и др.

Выгорающие добавки повышают пористость керамических изделий и способствуют равномерному спеканию керамического черепка [6].

Применение отходов топливно-энергетического комплекса в качестве отощителей, представленных в табл. 5, в количестве от 20 до 30 % на основе межсланцевой глины (без природных традиционных материалов) позволяет получать керамический кирпич марок от 125 до 150. Использование отходов топливно-энергетического комплекса в качестве плавней (от 15 до 25 %) или интенсификаторов спекания (от 5 до 15 %) на основе межсланцевой глины дает возможность получать керамический кирпич при обжиге 1000 °С марок от 125 до 150.

Таким образом, получены керамические теплоизоляционные материалы на основе отходов топливно-энергетического комплекса без применения природного традиционного сырья.

Исследуемые отходы имеют повышенную теплоту сгорания, поэтому их целесообразно использовать не только в качестве отощителей, но и в качестве выгорающих добавок, что позволит исключить из составов керамических масс антрацит, коксовую мелочь и др.

Выгорающие добавки повышают пористость керамических изделий и способствуют равномерному спеканию керамического черепка.

Использование отходов топливно-энергетического комплекса в производстве теплоизоляционных материалов способствует утилизации промышленных отходов, охране окружающей среды и расширению сырьевой базы для строительных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник инженера по охране окружающей среды (эколога). М.: Инфра-инженерия, 2005. 864 с.
2. Кайракбаев А.К., Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Исследование регрессивным методом зависимости отходов топливно-энергетической промышленности на сушильные свойства стеновой керамики // Экология промышленного производства. 2015. № 1. С. 6–10.
3. Беспалова К.В. Оценка экологического состояния, региональное нормирование и плата за загрязнение водных объектов // Вестн. Самар. гос. экон. ун-та. Спец. вып. 2014. С. 66–73.
4. Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Экологические, теоретические и практические аспекты использования шламов флотационного углеобогащения в производстве теплоизоляционных материалов // Кокс и химия. 2013. № 3. С. 39–44.
5. Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Отходы горючих сланцев в производстве керамических материалов // Журн. РАН. Энергия: экономика, техника, технология. 2013. № 8. С. 49–54.
6. Сайбулатов С.Ж., Сулейменов С.Т., Ралко А.В. Золокерамические стеновые материалы. Алма-Ата: Наука, 1982. 292 с.
7. Абдрахимов В.З. Производство керамических изделий на основе отходов энергетики и цветной металлургии. Усть-Каменогорск: Вост-Казахстан. гос. ун-т, 1997. 290 с.

***Абдрахимов Владимир Закирович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: 3375892@mail.ru*
Самарский государственный экономический университет
***Никулина Екатерина Юрьевна**, асп.; E-mail: katerina_nikulina@list.ru*
Самарский государственный экономический университет
***Абдрахимова Елена Сергеевна**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: 3375892@mail.ru*
Самарский государственный аэрокосмический университет

Получено 20.08.15

Abdrakhimov Vladimir Zakirovich, DSc, professor; E-mail: 3375892@mail.ru, Samara State University of Economics, Russia
Nikulina Ekaterina Yur'evna, post-graduate student; E-mail: katerina_nikulina@list.ru, Samara State University of Economics, Russia
Abdrakhimova Elena Sergeevna, PhD, assistant professor; E-mail: 3375892@mail.ru, Samara State Aerospace University, Russia

INNOVATIVE TRENDS ON THE USE OF WASTE FUEL AND ENERGY COMPLEX IN THE PRODUCTION OF CERAMIC MATERIALS

The obtained ceramic heat-insulating materials on the basis of waste fuel and energy complex without the use of traditional natural materials. The investigated wastes have high calorific value, so it is advisable to use them not only as atomically, but as a burnable additives that will prevent the use in the compositions of ceramic masses of anthracite, coke breeze, etc. Burnable additives not only increase the porosity of ceramic products, but also contribute to the uniform sintering of the ceramic crock. The use of waste fuel and energy complex in the manufacture of insulating materials promotes recycling of industrial waste, the protection of the environment and expansion of the resource base for building materials.

Keywords: waste fuel and energy complex, insulation materials, burnable additives, waste disposal, chemical composition, physical and mechanical properties.

REFERENCES

1. Spravochnik inzhenera po okhrane okruzhayushchey sredy (ekologa) [The engineering Handbook on the protection of the environment (the ecologist)]. Moscow: Infra-engineering, 2005, 864 p. (rus.)
2. Kayrakbaev A.K., Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. Issledovanie regressivnym metodom zavisimosti otkhodov toplivno-energeticheskoy promyshlennosti na sushil'nye svoystva stenovoy keramiki [Study of the regressive method according to waste the energy industry on the drying properties of wall ceramics]. Ekologiya promyshlennogo proizvodstva [Ecology of industrial production], 2015, No. 1, pp. 6–10 (rus.)
3. Bespalova K.V. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya, regional'noe normirovanie i plata za zagryaznenie vodnykh ob"ektov [Assessment of ecological condition, regional regulation and the payment for water pollution]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta. Spetsial'nyy vypusk [Vestnik of Samara state University of Economics. Special edition], 2014, pp. 66–73 (rus.)
4. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. Ecologicheskie, teoreticheskie i prakticheskie aspekty ispol'zovaniya shlamov flotatsionnogo ugleobogashcheniya v proizvodstve teploizolyatsionnykh materialov [Environmental, theoretical and practical

aspects of the use of slurry flotation coal in the manufacture of insulating materials]. Koks i khimiya [Coke and chemistry], 2013, No. 3, pp. 39–44 (rus.)

5. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. Otkhody goryuchikh slantsev v proizvodstve keramicheskikh materialov [Waste of oil shale in the production of ceramic materials]. Zhurnal RAN. Energiya: ekonomika, tekhnika, tekhnologiya [Journal of Russian Academy of Sciences. Energy: economy, technics, technology], 2013, No. 8, pp. 49–54 (rus.)
6. Saybulatov S.Zh., Suleymenov S.T., Ralko A.V. Zolokeramicheskie stenovye materialy [Ash ceramic wall materials]. Alma-Ata: Nauka, 1982, 292 p. (rus.)
7. Abdrakhimov V.Z. Proizvodstvo keramicheskikh izdeliy na osnove otkhodov energetiki i tsvetnoy metallurgii [Production of pottery on the basis of waste of power and nonferrous metallurgy]. Ust-Kamenogorsk: East Kazakhstan State University, 1997, 290 p. (rus.)

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 627.5.001.2

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

ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ХВОСТОХРАНИЛИЩА КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА

Рассматриваются вопросы проектирования хвостохранилища, представляющего собой карьер, заполненный водой, и дополнительную емкость, созданную ограждающей дамбой. Оптимальный вариант заполнения хвостохранилища удовлетворяет трем критериям: максимальной принимающей способности при гидравлическом складировании отходов рудообогащения, экологическим требованиям по размещению площадки строительства и объекта в пределах землеотвода.

Ключевые слова: определение объема хвостохранилища, намыв хвостов в глубокий карьер, ограждающая дамба, осаждение частиц, система гидротранспорта, оборотное водоснабжение.

В настоящее время наиболее распространенным способом утилизации отходов горнодобывающей промышленности является их гидравлическое складирование в специальных сооружениях — хвостохранилищах, представляющих комплекс сооружений, образующих емкость (ограждающие дамбы), водосбросные и водоотводящие сооружения. Проектирование хвостохранилищ комбинированного типа, при котором необходимо решать множество задач, связанных с созданием необходимой емкости и выбором типа ограждающих дамб, параметров технологии заполнения хвостохранилища, обеспечением осаждения частиц заданной крупности и отводом осветленной воды в оборотную систему водоснабжения обогатительной фабрики, недостаточно обосновано теоретически, не имеет регламентаций по ряду вопросов и поэтому является актуальной темой для исследования.

При выборе концепции организации хвостохранилища были учтены требования по расположению накопителя вне водораздела существующего в регионе водохранилища питьевого водоснабжения на урбанизированной территории, где имеется наполненный водой карьер, что позволит размещать хвосты в выработанное пространство и, следовательно, минимизировать негативное воздействие на окружающую среду и уменьшить плату за размещение отходов. Карьер окружен с северо-восточной и северо-западной сторон отвалами засоленных пород, с восточной стороны — отвалами пустых пород (рис. 1).

По классификации накопителей в зависимости от рельефа проектируемое хвостохранилище относится к котлованному типу, а при не-

© Дзюбенко Л.Ф., Кузнецова Ю.А., Соколова В.А., 2015

Рис. 1. Космический снимок расположения объекта проектирования

обходимости увеличения его емкости за счет возведения ограждающих сооружений — к котлованному. Хвостохранилище принадлежит к I классу.

Весь срок эксплуатации хвостохранилища разбит на три этапа:

— складирование хвостов в емкость карьера;

— ограждение части периметра хвостохранилища ограждающей дамбой на водонепроницаемом основании до отметки технологической дороги;

— дальнейшее наращивание ограждающей дамбы путем отсыпки дамб высотой 3–4 м с последующим намывом нормативного пляжа длиной 50 м.

На первом этапе эксплуатации хвостохранилища предлагается емкость карьера последовательно разбивать на карты при помощи фильтрующих

дамб с использованием свободного объема в качестве маневровой емкости оборотного водоснабжения обогатительной фабрики (ОФ). Размеры карт намыва должны обеспечивать условия осаждения частиц грунта диаметром мельче, чем 0,1 мм. При этом свободный объем в период выхода ОФ на сезонную мощность предполагается равным объему водозабора с запасом, обеспечивающим нормальную работу всасывающего оголовка насосной плавучей станции.

На втором этапе эксплуатации хвостохранилища планируется рассмотреть возведение ограждающей дамбы до отметки технологической дороги, проходящей вдоль восточного борта карьера, а ниже карьера организовать маневровую емкость, в которую сбрасывать сток с нагорных канав.

На третьем этапе эксплуатации хвостохранилища выполняется поэтапное наращивание ограждающей дамбы II очереди, конструкция которой определяется в ходе вариантного проектирования.

Важным этапом проектирования является оценка притока поверхностных вод к карьеру, что потребовало применения специальных методов расчета из-за гидрологической неизученности территории. Гидрологические расчеты выполнены с использованием результатов инженерно-гидрометеорологических изысканий для рек — аналогов (данные заказчика) в соответствии с нормативным документом[1]. Максимальные расчетные расходы весеннего половодья составили: $Q_р$ = 1,131 м^3/с (обеспеченность p = 0,01 %); $Q_р$ = 0,837 м^3/с (p = 0,1 %). Максимальные расчетные расходы дождевых паводков, поступающих в карьер с водосборной площади, составили: $Q_р$ = 0,374 м^3/с (p = 0,01 %); $Q_р$ = 0,305 м^3/с (p = 0,1 %). Объемы годового стока в карьер: весеннее половодье W = 206,55 тыс. м^3 (p = 0,01 %); W = 165,45 тыс. м^3 (p = 0,1 %); дождевой паводок W = 69,32 тыс. м^3 (p = 0,01 %); W = 56,50 тыс. м^3 (p = 0,1 %).

Для перехвата стока с соляных отложений, окружающих карьер, предусмотрены нагорные канавы. При повышенной концентрации солей происходит не только их оседание в трубах для водоснабжения и насосном оборудовании, что уменьшает площадь поперечного сечения труб и пропускаемый расход, но и разрушение труб. Расчетные расходы определены для частных водосборных площадей нагорных канав, затем для каждого участка нагорных канав путем суммирования притока по их длине. Объемы стока в карьер при наличии нагорных канав составили: весеннее половодье W = 84,31 тыс. м^3 (p = 0,01 %); W = 67,53 тыс. м^3 (p = 0,1 %); дождевой паводок W = 28,29 тыс. м^3 (p = 0,01 %); W = 23,06 тыс. м^3 (p = 0,1 %).

Основываясь на данных заказчика о годовом выходе хвостов, гранулометрическом составе отвальных продуктов, согласно рекомендациям по определению плотности грунта, направляемого на гидравлическое складирование [1, 2], вычислен необходимый объем хвостохранилища. Трудности при этом вызвало определение плотности материала, направляемого в карьер. В специальной литературе имеются формулы для расчета плотности скелета грунта (объемная масса грунта по терми-

[1] СП 33-101–2003. Определение расчетных гидрологических характеристик. М., 2004.

нологии источников[2] [3] $\gamma_{ск}$) по гранулометрическому составу с использованием понятий «предельно рыхлое» $\gamma_{пр.р}$ и «предельно плотное» $\gamma_{пр.п}$ состояния. Вычисленные значения $\gamma_{пр.р}$ = 1,312 т/м^3, $\gamma_{пр.п}$ = 1,942 т/м^3, $\gamma_{ск}$ = 1,428 т/м^3. Сравнение полученного значения $\gamma_{ск}$ с величиной, определенной по эмпирической формуле В.И. Огурцова [2], предложенной при намыве в воду до глубин 10 м, $\gamma_{ск}$ = 1,494 т/м^3, показало, что результаты отличаются на 4,6 %.

Годовой объем, необходимый для складирования хвостов указанной плотности, вычисляется по формуле [1]

$$V = \frac{Q}{K_з \, \gamma_{ск}}, \tag{1}$$

где Q — выход хвостов за год, т;
$K_з$ — коэффициент заполнения хвостохранилища, принимается равным 0,85; $\gamma_{ск}$ — объемный вес скелета грунта, укладываемого гидравлическим способом.

Необходимый объем на весь период эксплуатации (2017–2035 гг.) составил 7774 тыс. м^3 (с учетом периода выхода ОФ на полную мощность и сезонности ее работы).

Для установления динамики заполнения карьера и дополнительной емкости потребовался расчет водно-шламового баланса. Используя результаты промерных работ, были построены батиграфические характеристики карьера, в том числе отдельных секций и дополнительной емкости. Расчеты показали, что емкость карьера исчерпается на восьмом, а дополнительной емкости, созданной ограждающей дамбой I очереди, — на 11-м году эксплуатации хвостохранилища. Дефицит емкости составляет более 4 млн м^3, что вызывает необходимость дальнейшего наращивания ограждающей дамбы. Расчет водного баланса, выполненный при объеме откачки, определенном заказчиком с учетом сезонности работы ОФ — 1275,11 м^3/ч и удельном расходе воды на транспортирование 1 т исходных песков — 4,34 м^3, выявил необходимость подкачки воды в карьер к началу сезона 2025 г. При дефиците водных ресурсов нецелесообразность устройства нагорных канав очевидна.

Было рассмотрено два варианта первичной ограждающей дамбы. Вариант дамбы I очереди (в совокупности с отсечной дамбой в северной части карьера) с отметкой гребня, равной отметке технологической дороги, расположенной на минимальном расстоянии от борта карьера, был впоследствии отвергнут по ряду причин. Во-первых, она не покрывает дефицит емкости, во-вторых, препятствует размещению ограждающей дамбы II очереди. Учитывая отмеченные недостатки, было предложено отодвинуть основание дамбы от бровки карьера, придав ей в плане прямолинейные очертания. При этом обязательным условием считается удаление солевых отложений в основании дамбы согласно СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов (Актуализированная редакция СНиП 2.06.05–84*).

[2] Инструкция по гидравлическому расчету систем напорного гидротранспорта грунтов / П 59-72. Л., 1972.

Вариантом ограждающей дамбы II очереди является дамба поэтапного наращивания для образования емкостей (ярусов) насыпными дамбами высотой 4 м. На восточной части карьера дамба I очереди наращивается путем отсыпки «дамбочек» высотой 4 м, опирающихся на намытый пляж, сопрягающихся друг с другом (рис. 2). На остальной части карьера ограждающая дамба II очереди будет возводиться путем досыпки профиля до отметки гребня дамбы наращивания соответствующего яруса с применением мероприятий, обеспечивающих надежное сопряжение сооружений (рис. 3). Конструкция дамб обоснована расчетами фильтрации и устойчивости низового (внешнего) откоса.

Для ликвидации водного дефицита при сооружении ограждающей дамбы II очереди был рассмотрен вопрос о создании маневровой емкости в логу ниже карьера. Маневровая емкость образована плотиной, по конструкции аналогичной ограждающей дамбе I очереди, отметка гребня которой установлена с учетом ограничения объема емкости из-за требования минимизации площади затопления. Определен приток воды к создаваемому водоему и построены его батиграфические характеристики. Указанные ограничения по объему маневровой емкости не позволяют полностью решить проблему дефицита оборотной воды, поэтому в качестве варианта предлагается использовать техническую воду других предприятий, расположенных в пределах 3,7 км от проектируемого хвостохранилища.

Наиболее неисследованным вопросом при проектировании хвостохранилища рассматриваемого типа является намыв хвостов в карьер глубиной до 30 м. Современные исследования глубоководного намыва при разработке глубинных месторождений [4] показали, что частицы в океанической среде перемещаются по траекториям, отражающим не только движение частиц по горизонтали и свободное падение, но и их взвешивание в потоке, что не учитывается в расчетных схемах [2]. На характер движения частицы оказывают влияние глубина выпуска пульпы под воду, концентрация пульпы, скорость поступления пульпы в водную среду и течения. Перенос результатов исследований на карьеры, в которых отсутствуют донные

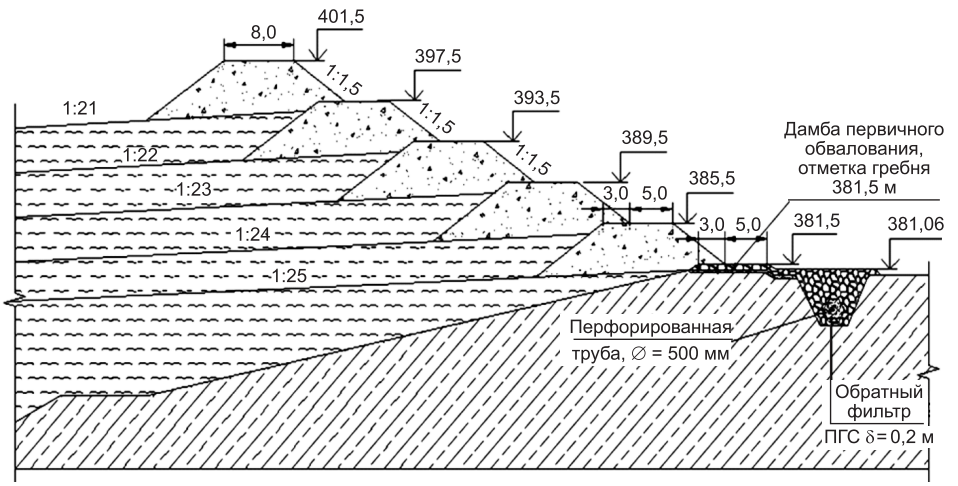


Рис. 2. Конструкция правобережной дамбы

течения и глубины существенно ниже шельфовых, является неправомерным.

На накопителях горнодобывающей промышленности используют для удлинения пути осаждения частиц метод картирования, однако для карьеров такой опыт не имеет научного обоснования. Как показали расчеты, разделение карьера на отсеки наряду с обеспечением условий для водозабора оборотной воды, забираемого из отсека плавучей насосной станцией, существенно сокращает объем емкости для складирования. Например, возведение разделительной фильтрующей дамбы в глубоководной части карьера равноценно потере емкости, сопоставимой с годовым объемом складирования.

Для определения пути осаждения частиц были проанализированы различные расчетные методы [2, 3]. Расчеты, выполненные по упрощенному методу, для частиц хвостов диаметром от 0,001 до 3 мм (средний диаметр 0,28 мм), имеющих гидравлическую крупность 0,00079–232,5 мм/с, при содержании частиц диаметром $d \leq 0{,}1$ мм 56 %, показали, что в наиболее крупных отсеках карьера глубиной 30 и 25 м недостаточен путь осветления. Используемый метод, предполагающий осреднение скорости движения по входному сечению потока и соотношение ее с гидравлической крупностью, является достаточно приближенным, решения получены для от-

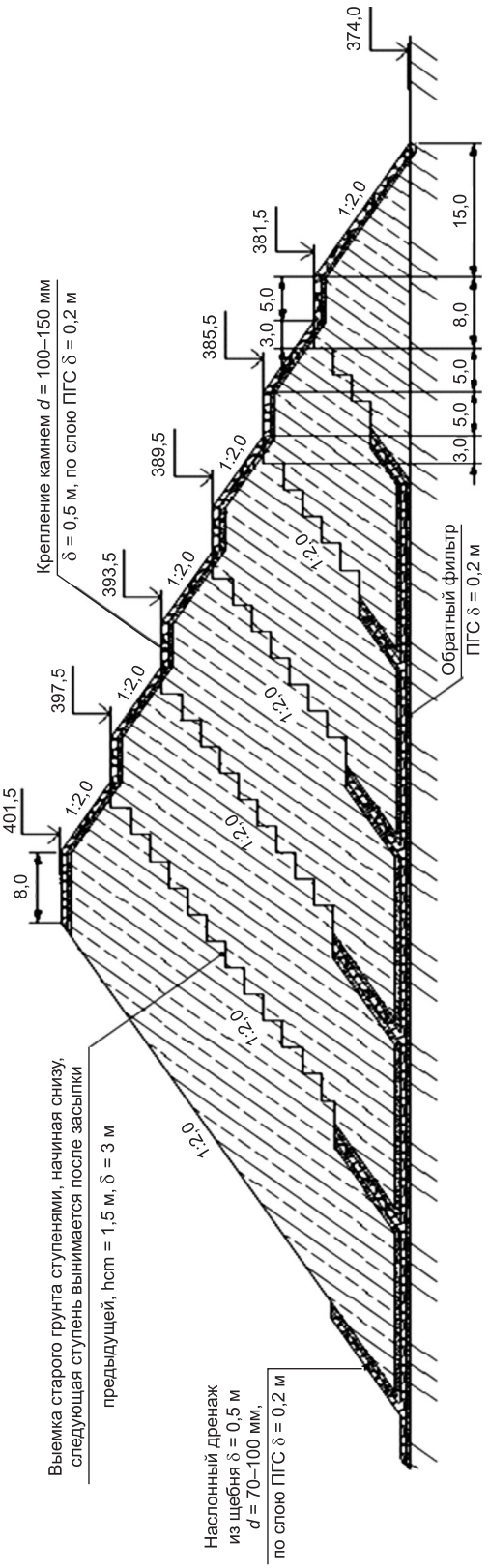


Рис. 3. Конструкция западной дамбы из суглинка

стойных прудов глубиной не более 4 м. Анализ результатов выявил несовершенство упрощенного метода, не учитывающего турбулентную составляющую скорости движения пульпы при ее выпуске в карьер, а также правомерность его применения для глубоких карьеров. Уточненное решение Д.И. Соколова [2] предполагает, что горизонтальная составляющая скорости перемещения частицы изменяется по вертикали в соответствии с эмпирически установленной закономерностью:

$$\nu = \frac{\nu_{\max}}{\sqrt[k]{H_0}} \sqrt[k]{Z}, \tag{2}$$

где v — средняя поступательная скорость потока на заданной глубине;

$$k = 1 + 4{,}8 \sqrt[12]{\frac{H_0}{v_{\max}}}, \tag{3}$$

где $v_{\max}$ — поверхностная скорость течения потока.

Для определения скорости v воспользуемся рекомендациями ВНИИГ [5], в соответствии с которыми при расходе воды в системе гидротранспорта в пределах 1000–2000 м^3/ч $v = 0{,}45$ м/с;

H_0 — полная глубина карьера в рассматриваемой емкости;

Z — глубина, исчисляемая от дна карьера.

Путь осаждения частиц на расстоянии x от выпуска пульпы рассчитывается по формуле [2]:

$$Lx = \frac{k}{k+1} \frac{v_{\max}}{W_1} \left[H_0 - \sqrt[k]{(H_0 - y)^{k+1} / H_0} \right], \tag{4}$$

где W_1 — скорость осаждения частиц, определяемая как результирующая поступательной скорости v и вертикальной скорости u. Вертикальная составляющая скорости движения частиц вычисляется по известной формуле В.Н. Гончарова [2]. Расчеты показали, что размеры емкостей достаточны для осаждения частиц указанного гранулометрического состава.

Экономическая целесообразность диктует заполнение карьера в режиме безнапорного гидротранспорта, что позволяет эксплуатировать его максимально возможный срок. Из всех рассматриваемых вариантов расположения ОФ принят вариант, обеспечивающий максимальный напор при гидротранспорте — устройство ее на самых высоких отметках, на рекультивированном отвале пустых пород, находящемся в непосредственной близости от карьера. Существующие методы расчета безнапорного гидротранспорта не обладают достаточным теоретическим обоснованием. Это связано в первую очередь со сложными процессами при движении двухфазной жидкости, в которой взвесенесущей жидкостью является вода, влиянием гидравлических и технологических факторов, свойствами русла потока и характеристиками хвостов.

При выборе метода расчета отдано предпочтение инженерным способам, изложенным в нормативном документе [3]. Расчеты выполнены с использованием уравнения Шези при следующих исходных данных, определенных в соответствии с рекомендациями [2]: расход транспортируемого

материала $Q_т$ = 88,93 м³/ч; водная составляющая пульпы $Q_в$ = 1275,11 м³/ч; расход пульпы $Q_п$ = 1364,037 м³/ч; объемная концентрация твердого материала в пульпе S = 6,52 %; плотность материала $\rho_т$ = 2,34–2,7 т/м³; средневзвешенный диаметр транспортируемых частиц $d_{ср}$ = 0,28 мм; плотность пульпы $\rho_п$ = 1,087–1,108 т/м³ ($\rho_{ср}$ = 1,099 т/м³); уклон местности по трассе пульповода i = 0,0608 (при рекомендованном в [3] уклоне 4–7 %). Расчеты выполнены для металлических труб диаметром 400, 500, 600, 700 мм, работающих в безнапорном режиме, при степени наполнении труб не более 0,7. Наиболее важным является определение критической скорости в соответствии с рекомендациями [3] по формуле:

$$v_{кр} = 4{,}9S^{0{,}36}\left(\sqrt{g}D / C_j^{1/4}\right), \tag{5}$$

где S — объемная концентрация пульпы, %;
C_j — коэффициент лобового сопротивления, определяется по таблице [3] в зависимости от среднего значения коэффициента транспортабельности Y для материала в целом;
D — диаметр пульповода, м;
g — ускорение свободного падения, м/с².

Скорость, обеспечивающая эффект транспортирования, должна быть больше критической $v_{тр} = 1{,}1v_{кр}$. С учетом осреднения по фракциям, мм: d < 0,1; 0,1–1,0 и 1,0–3,0, средневзвешенное значение коэффициента транспортабельности $Y_{ср}$ = 0,093. Расчеты показали возможность использования металлических труб D = 500 мм при обеспечении расчетной скорости движения пульпы $v_р$ = 2,581 м/с (критическая скорость $v_{кр}$ = 2,071 м/с и скорость транспортирования $v_{тр}$ = 2,278 м/с). Однако на начальном этапе, при выходе ОФ на полную мощность пульповод может работать в режиме заиления. В качестве альтернативного варианта рассмотрен металлический желоб, изготавливаемый из труб диаметром 900, 1000, 1200 мм, устанавливаемый на опорах. Наиболее приемлемое решение — желоб из трубы D = 1000 мм. Оба варианта требуют постоянного эксплуатационного контроля за процессом заиления.

С 2027 г. возникает потребность в напорной системе гидротранспорта. Поскольку высота дамбы не позволит сохранить рабочие уклоны, необходимо разработать порядок монтажа напорной системы гидротранспорта, разбив перепад уровней на несколько ступеней, увязанных с количеством дамб наращивания. Гидравлический расчет системы производится на максимальный напор, которым должен обладать грунтовый насос для преодоления геодезического перепада высот (допускается [3] режим частичного заиления). Для определения требуемой скорости транспортирования пульпы в напорном трубопроводе были проанализированы рекомендуемые [3, 5 и др.] формулы для определения $v_{кр}$, учитывающие в разной степени такие факторы, как эффект взвешивания частиц в потоке, их гидравлическую крупность, размеры частиц $d_{ср}$, диаметр пульповода D и шероховатость его стенок, объемную консистенцию пульпы, коэффициент транспортабельности и вязкость взвесенесущей жидкости.

Результаты расчетов для D = 400, 500, 600 мм показали, что отличия критических скоростей (максимальной и минимальной) от осредненной скорости пульпы составляют 11,6–11,9 %. При скорости движения пульпы, близкой к критической, процесс транспортирования будет наименее энергоемким, что отмечается при использовании труб диаметром 500 и 600 мм, но при этом труба D = 500 мм будет работать в режиме заиления. Определение удельных гидравлических потерь в системе напорного гидротранспорта как суммы потерь при движении чистой воды и дополнительных потерь, обусловленных наличием твердых частиц в потоке, с учетом снижения шероховатости труб в процессе транспортирования до постоянной величины [3, 5], позволило вычислить общие потери напора в системе (около 22 м). Остаточный напор системы (например, в случае выпуска пульпы из торца трубы или удлинение пути транспортирования или изменение конструктивных элементов системы и т.п.) принимается по рекомендациям [3] от 3 до 5 м. Грунтовый насос подобран на производительность по пульпе 1364 м^3/ч и воде 2175,1 м^3/ч и напоре 26 м.

Система оборотного водоснабжения рассчитана при наличии свободного напора на ОФ 30 м, при этом конструкция системы предполагает забор осветленной воды как из карьера, так и из маневровой емкости. Расчеты показали необходимость оборудования плавучих насосных станций высоконапорными насосами (напор свыше 107 м).

Выводы. 1. При проектировании хвостохранилищ, использующих карьеры, необходим комплексный подход, учитывающий технологические параметры рудообогащения, соблюдение норм проектирования, правил безопасности при безусловном приоритете экологических требований к размещению накопителей, их строительству и эксплуатации в рамках экономической целесообразности принятых решений.

2. Необходимы дальнейшие исследования процессов осаждения и условий осветления частиц заданного диаметра в глубоких карьерах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рекомендации по проектированию хвостохранилищ в суровых климатических условиях. М.: Стройиздат, 1977. 152 с.
2. Нурок Г.В. Гидромеханизация горных работ. М.: Недра, 1970. 584 с.
3. Пособие по проектированию гидравлического транспорта (к СНиП 2.05.07–85) / Промтрансниипроект. М.: Стройиздат, 1988.
4. Оздоева Б.М. Технология глубоководного намыва пород при добыче железомарганцевых образований Мирового океана: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2006.
5. Рекомендации по проектированию золошлакоотвалов тепловых электрических станций / П 26-85; ВНИИГ. Л., 1986. 125 с.

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

Соколова Валентина Андреевна, *доц.*
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 13.08.15

Dzyubenko Lubov Fedorovna, PhD, assistant professor; E-mail: ludzju@yandex.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Kuznetsova Yuliya Anatol'evna, PhD, assistant professor; E-mail: kuznecovaj.2010@yandex.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Sokolova Valentina Andreyevna, assistant professor; E-mail: ngasu_gts@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

DESIGN EXPERIENCE OF A COMBINED TYPE TAILINGS DAM

Question of a tailings dam design are considered in this paper. The tailings dam is repiesented by a submerged trench and an additional reservoir formed by a bund wall. The optimal version of the tailings dam filling meets the requirements according to 3 criteria: greatest available volume of the tailings dam with hydraulic storage of ore processing wastes, the ecology requirements for a building site location, object arrabgement within land allocation.

Keywords: tailings dam volume estimations, alluvion of mills into a dup submerged trench, bund wall, sedimentation, hydrotransportation system, recicling water sypply.

REFERENCES

1. Recomendatsii po proektirovaniyu khvostokhranilishch v surovykh klimaticheskikh usloviyakh [Recommendations for the design of tailings dam in harsh climatic conditions]. M., Stroyizdat, 1977, 152 p. (rus.)
2. Nurock G.V. Gidromekhanizatsiya gornykh rabot [Hydromechanization of mining operations]. M., Nedra, 1970, 584 p. (rus.)
3. Posobie po proektirovaniyu gidravlicheskogo transporta [Manual on designing hydraulic transport]. M., Stroyizdat, 1988 (rus.)
4. Ozdoeva B.M. Tekhnologiya glubokovodnogo namyva porod pri dobyche zhelezomargantsevykh obrazovaniy Mirovogo okeana: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. [Technology of deep-water alluvium of the rocks in the extraction of iron manganese formations of the World Ocean. The dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical sciences]. M., 2006 (rus.)
5. Recomendatsii po proektirovaniyu zoloshlakootvalov teplovykh elektricheskikh stantsiy [Recommendations for the design of hydraulic transport]. L., 1986, 125 p. (rus.)

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.542.001

М.П. ДМИТРИЕВ, Д.Э. АБРАМЕНКОВ, М.И. ГАЙДУЧИК, ГЭНДЭН БАТТУЛГА, М.С. МАЛЫШЕВ, Э.А. АБРАМЕНКОВ

ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ УДАРНЫЙ МЕХАНИЗМ МОЛОТА С АККУМУЛЯЦИОННОЙ И ТОРМОЗНОЙ КАМЕРАМИ И ЕГО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Рассматривается пневмоударный механизм с камерами перепуска со стороны полости холостого хода.

Ключевые слова: передняя камера холостого хода, задняя камера холостого хода, тормозная камера рабочего хода, аккумуляционная камера рабочего хода.

Статья посвящена рассмотрению пневмоударного механизма с перепуском воздуха между рабочими камерами. Известны пневмоударные механизмы с выпуском отработавшего воздуха посредством центральных трубок[1–13]. Другие аналогичные пневмоударные механизмы показаны в работе [1]. Классификационные признаки указанных элементов рассмотрены в работах [1, 2]. Там же приведены примеры анализа и синтеза известных признаков-элементов, позволяющих получить оригинальные комбинации при поиске новых технических решений пневмоударных механизмов.

---

[1] Pat. 344483 (Deuts.). Drucklufthammer / A. Bailly; Publ., 1921.

[2] Pat. 373639 (Deuts.). Drucklufthammer / A.Bailly; Publ., 1921.

[3] Pat. 546489 (Deuts.). Ventillos qestcurter Presslufthammer mit hohlen Kolben / InqersoII, Rand company; Publ., 1932.

[4] Pat. 766864 (Franc.). Marten pneumatique sans soupapes / M.C. Schmal. Publ., 1934.

[5] А.с. 250816 СССР. Пневмоударный механизм / Э.Г. Чернилов, А.И. Бажал, Е.И. Пригожин; опубл. 1969, Бюл. № 27.

[6] Pat. 3503459 (USA). Percussion drill motor / M.E. Schindler; Publ., 1970.

[7] А.с. 354086 СССР. Пневматическое устройство для образования скважин в грунте / Б.В. Суднишников, А.Д. Костылев, К.С. Гурков и др.; опубл. 1972, Бюл. № 30.

[8] А.с. 531908 СССР. Пневматическое устройство для пробивания скважин в грунте / Б.В. Суднишников, В.В. Каменский, К.С. Гурков и др.; опубл. 1976, Бюл. № 38.

[9] Pat. 4084646 (USA). Fluid actuated impact tool / E.H. Kurt; Publ., 1978.

[10] А.с. 658268 СССР. Пневматический молоток / Э.А. Абраменков, В.Е. Килин, Ю.Н. Лебедев, Л.Л. Лысенко; опубл. 1979, Бюл. № 15.

[11] А.с. 927998 СССР. Бестраншейный снаряд ударного действия для проходки скважин / Б.В. Суднишников, В.В. Каменский, К.К. Тупицын, Э.П. Варнелло; опубл. 1982, Бюл. № 18.

[12] А.с. 1221339 СССР. Пневматический молоток / Э.А. Абраменков, А.Г. Богаченков, В.П. Брызгалов; опубл. 1986, Бюл. № 12.

[13] А.с. 1649090 СССР. Погружное пневмоударное устройство / Э.А. Абраменков, А.А. Липин, Д.Э. Абраменков и др.; опубл. 1991, Бюл. № 18.

© Дмитриев М.П., Абраменков Д.Э., Гайдучик М.И., Гэндэн Баттулга, Малышев М.С., Абраменков Э.А., 2015

С помощью инженерной методики расчета [3] представляется возможным определить базовые значения основных геометрических параметров пневмоударного механизма, которые при заданных основных значениях энергетических параметров позволяют детально получить кинематику и динамику синтезированного механизма, чем сокращаются сроки поиска наилучшего сочетания параметров машины для конкретных условий эксплуатации.

Детальное изучение рабочего процесса дает возможность исключить частично или полностью недостатки синтезированного пневмоударного механизма.

Рассмотрим принципиальное устройство (рис. 1) и рабочий процесс синтезированного пневмоударного механизма (обозначения размещены в тексте описания рабочего процесса).

Пневмоударный механизм работает следующим образом. После включения устройства пуска сжатый воздух посредством пневматического рукава подается через канал *10* в торцевую предкамеру *17*, образованную стаканом *8* и фланцем *12* с боковыми стенками *13*.

Из торцевой предкамеры *17* воздух поступает одновременно посредством радиального канала *14* в дополнительную кольцевую предкамеру *23* и посредством дроссельного канала *16* в камеру *4* рабочего хода и соединенные с ней кольцевую камеру *24* и кольцевую аккумуляционную камеру *25*, выполненные в выточках *26* и *28*, а также в кольцевую заднюю перепускную камеру *32* в выточке *34* и посредством глухого перепускного канала *19* на боковой поверхности ударника *3* в переднюю перепускную камеру *31* в выточке *33* и в камеру *5* холостого хода со стороны хвостовика *7* рабочего инструмента *6*.

Одновременно воздух поступает из дополнительной кольцевой предкамеры *23* посредством радиального перепускного канала *27* в стенке корпуса *1* в кольцевую камеру *24* торможения в выточке *26* и посредством радиального перепускного канала *29* в кольцевую аккумуляционную камеру *25* в выточке *28*, а также в кольцевую заднюю перепускную камеру *32* в выточке *34* и далее посредством глухого перепускного

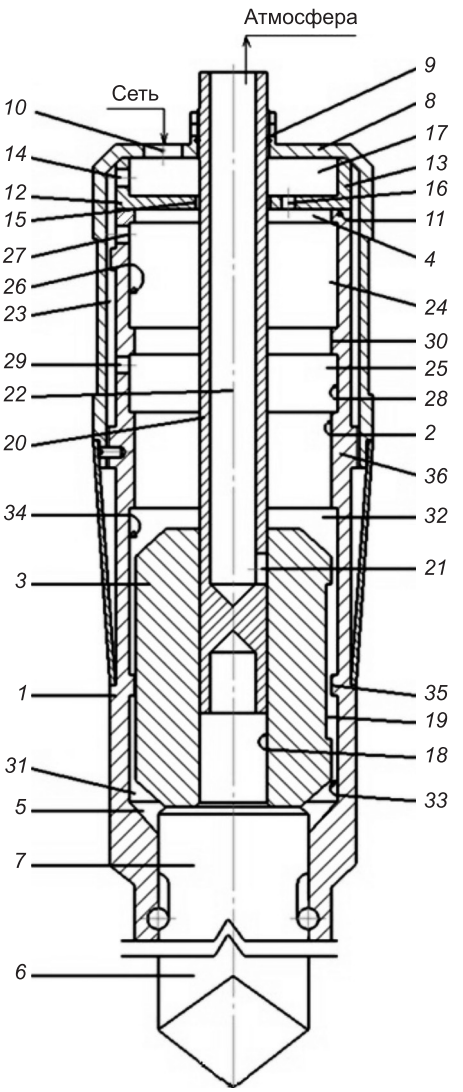


Рис. 1. Синтезированный пневмоударный механизм. Обозначения см. в тексте

канала *19* на боковой поверхности ударника *3* в кольцевую переднюю перепускную камеру *31* и камеру *5* холостого хода.

За счет динамического напора двух потоков воздуха со стороны камеры *4* рабочего хода в замкнутом объеме камеры *5* холостого хода давление воздуха увеличивается из-за образования более уплотненного объема воздуха. При этом со стороны камеры *4* рабочего хода давление воздуха будет уменьшаться из-за проточности и большего количества объема в сравнении с объемом камеры *5* холостого хода.

Таким образом, из-за разницы давлений со стороны камеры *4* рабочего хода и камеры *5* холостого хода ударник *3* начнет движение в сторону камеры рабочего хода. Преодолевая противодавление воздуха со стороны аккумуляционной камеры *25* и камеры *24* торможения, ударник *3* совершает холостой ход. Перемещаясь в сторону камеры *4* рабочего хода, ударник *3* перекроет кольцевой буртик *35* и кольцевой буртик *36* корпуса *1*, откроет доступ воздуха из камеры *25* по каналу *19* ударника в кольцевую заднюю камеру *32* и кольцевую переднюю камеру *31* со стороны камеры *5* холостого хода, в результате чего камера *5* холостого хода подзарядится и ударник получит добавочный импульс давления и продолжит перемещение в сторону камеры рабочего хода.

Двигаясь, ударник *3* перекроет буртик *36* корпуса *1* и откроет буртик *30*, в результате чего камера *24* торможения сообщится с аккумуляционной камерой *28*, что понизит давление воздуха в камере *24* торможения и снизит противодавление воздуха на ударник, который к этому моменту откроет своим торцом со стороны осевого сквозного канала *18* выпускной радиальный канал *21* в стержне-трубке *20* и посредством продольного осевого канала *22* сообщится с атмосферой, в результате чего давление воздуха в камере *5* холостого хода понизится до атмосферного.

Перемещаясь по инерции, ударник *3* будет затормаживаться и остановится в расчетном положении при закрытии буртиком *36* корпуса *1* сообщения аккумуляционной камеры *25* с кольцевой задней камерой *32*. Таким образом, кольцевая аккумуляционная камера *25* и кольцевая камера *24* торможения не сообщаются посредством выпускного радиального канала *21* и продольного осевого канала *22* в стержне-трубке *20* с атмосферой.

Сразу после остановки под действием сил давления воздуха со стороны камеры *4* рабочего хода и камеры *24* торможения ударник *3* начнет движение в сторону хвостовика *7* инструмента *6*. При отсутствии противодавления воздуха со стороны кольцевой задней камеры *32*, кольцевой передней камеры *31* и камеры *5* холостого хода и при поступлении воздуха из торцевой предкамеры *17* посредством дроссельного канала *16* и воздуха из дополнительной предкамеры *23* через радиальный перепускной канал *27*, а также воздуха из кольцевой аккумуляционной камеры *25*, поступающего через радиальный перепускной канал *29*, и посредством глухого перепускного канала *19* на боковой поверхности ударника *3* воздух, обтекая кольцевой буртик *30*, наполняет кольцевую камеру *24* торможения. Под действием сил давления со стороны кольцевой камеры *24* ударник *3* будет перемещаться ускоренно, совершая рабочий ход и после перекрытия кольцевого буртика *30* до начала открытия кольцевого буртика *36* и сообщения кольцевой аккумуляционной камеры *25* с кольцевой задней перепускной камерой *32*.

Перемещаясь, ударник *3* перекроет выпускной радиальный канал *21* и сообщение с атмосферой кольцевой задней перепускной камеры *32*, кольцевой передней перепускной камеры *31* и камеры *5* холостого хода посредством продольного осевого канала *22* в стержне-трубке *20* прекратится. С этого момента воздух из кольцевой аккумуляционной камеры *25* начнет перетекать в кольцевую заднюю камеру *32*, кольцевую переднюю камеру *31* и камеру *5* холостого хода и создавать противодавление и затормаживающее воздействие на ударник *3*, которое будет преодолеваться силами давления воздуха на торец ударника со стороны кольцевой аккумуляционной камеры и кольцевой камеры *24* торможения при одновременном поступлении воздуха в них через дроссельный канал *16* во фланце *12* из торцевой предкамеры *17* и посредством радиальных перепускных каналов *27* и *29* воздуха из кольцевой дополнительной предкамеры *23*.

После перекрытия ударником *3* кольцевых буртиков *36* и *35* поступление воздуха в кольцевую переднюю перепускную камеру *31* и камеру *5* холостого хода прекратится, что позволит уменьшить силы противодавления и торможение ударника, а следовательно, и сохранить скорость движения к хвостовику *7* рабочего инструмента *6*. При последующем движении ударник *3* откроет кольцевой буртик *35* и часть воздуха перетечет из кольцевой задней перепускной камеры *32*, посредством глухого перепускного канала *19* на боковой поверхности ударника, в кольцевую переднюю перепускную камеру *31* и камеру *5* холостого хода, чем повысится количество и давление воздуха со стороны камеры холостого хода. Перемещаясь к хвостовику *7* рабочего инструмента *6*, ударник *3* торцом со стороны *4* откроет доступ сжатого воздуха из кольцевой аккумуляционной камеры *25* и кольцевой камеры *24* торможения, что увеличит количество и давление воздуха со стороны кольцевой передней перепускной камеры *31* и камеры *5* холостого хода.

Преодолевая противодавление воздуха со стороны камеры *5* холостого хода, ударник *3* под действием сил давления со стороны кольцевой аккумуляционной камеры *25* и кольцевой камеры *24* торможения наносит удар по хвостовику *7* рабочего инструмента *6*. В результате соударения ударник *3* кроме импульса давления воздуха со стороны камеры *5* приобретает импульс отскока ударника от хвостовика *7* инструмента *6*, что позволяет ему начать движение от хвостовика в сторону камеры, совершая рабочий ход. Далее рабочий цикл повторяется.

Особенностью рабочего цикла является то, что отработавший воздух выпускается только из камеры *5* холостого хода, а воздух камеры *4* рабочего хода перепускается в камеру холостого хода для повторного его использования в следующем цикле со стороны камеры холостого хода. Функции глухого перепускного канала *19* на боковой поверхности ударника *3* без его выхода на торцы позволяют осуществить перепуски воздуха между кольцевыми камерами *25* и *24* со стороны камеры *4* рабочего хода и между кольцевыми камерами *32* и *31* со стороны камеры *5* холостого хода, а также кольцевой аккумуляционной камерой *25* и кольцевой задней перепускной камерой *32*, что создает устойчивый режим работы пневматического молота со сниженным непроизводительным расходом воздуха.

На рис. 1 обозначены элементы принципиальной схемы, не используемые на рис. 2 и при физико-математическом описании рабочего процесса:

2 — внутренняя поверхность корпуса; *9* — уплотнение между стержнем-трубкой и стаканом; *11* — опорный бутик корпуса; *15* — уплотнение между стержнем-трубкой и фланцем.

Зададимся базовыми энергетическими параметрами: энергия единичного удара, частота ударов, удельный расход воздуха, давление воздуха, подводимого к воздухораспределительной системе пневмоударного механизма, ожидаемое значение коэффициента отскока, показатель процесса, газовая постоянная для воздуха и скорость соударения ударника с хвостовиком рабочего инструмента (табл. 1).

Физико-математическое описание модели пневматического механизма выполним в соответствии с приведенным описанием рабочего процесса.

Введем обозначение к расчетной схеме пневмоударного механизма (рис. 2):

$V_{ПП}$, $V_{ЗП}$, V_1, $V_А$, $V_Т$, V_2, V_3, $V_{ДП}$, $V_{ТП}$ — объемы камер: передней перепускной, задней, в поясе между передней перепускной и задней перепускной, аккумуляционной, тормозной, в поясе между аккумуляционной и задней перепускной, в поясе между тормозной и аккумуляционной, дополнительной предкамеры и торцевой предкамеры;

$\omega_{ПП}$, $\omega_{ЗП}$, $\omega_А$, $\omega_Т$, $\omega_{ДП}$, $\omega_С$, $\omega_Р$ — проходные сечения каналов впуска в камеры с объемами $V_{ПП}$, $V_{ЗП}$, $V_А$, $V_Т$, $V_{ДП}$, $V_{ТП}$ и дроссельного канала впуска из торцевой предкамеры в камеру торможения;

$\omega_{АТ}$, $\omega_{АА}$, $\omega_С$ — проходные отверстия выпускных каналов из камер с объемами $V_{ПП}$, V_1, $V_{ЗП}$, в атмосферу и впускного канала из сети в предкамеру торцевую;

$P_{АА}$, $P_С$, $P_{ТП}$, $P_{ДП}$, $P_Т$, P_3, $P_А$, P_2, $P_{ЗП}$, P_1, $P_{ПП}$ — давление воздуха в атмосфере, сети, камерах с объемами $V_{ТП}$, $V_{ДП}$, $V_Т$, V_3, $V_А$, V_2, $V_{ЗП}$, V_1, $V_{ПП}$;

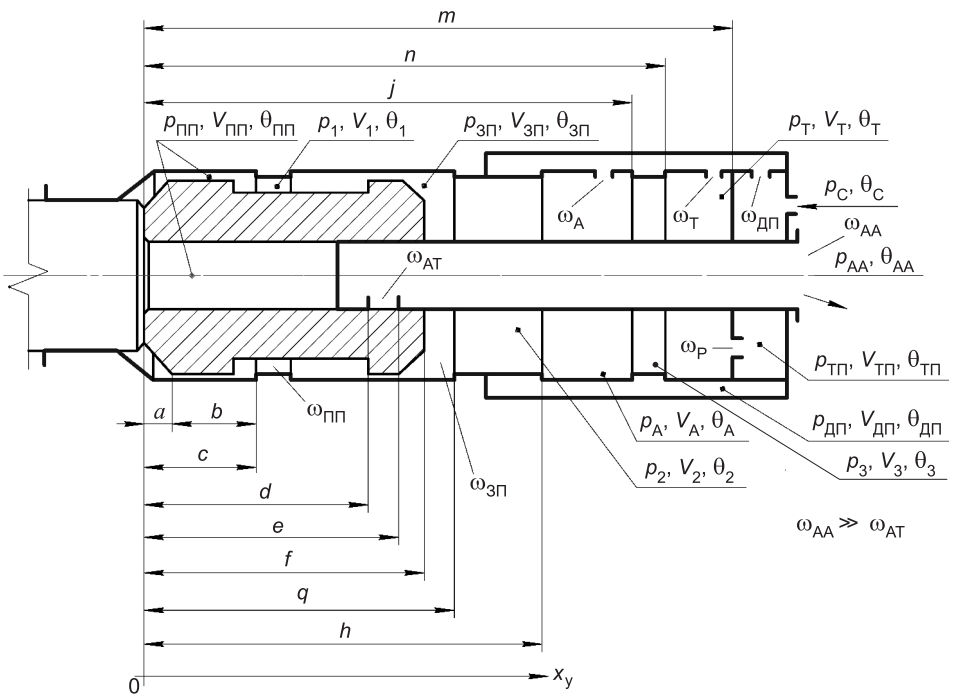


Рис. 2. Расчетная схема пневмоударного механизма

Таблица 1. **Значения заданных параметров для расчета геометрических размеров пневмоударного механизма**

Параметр	Обозначение	Заданное значение параметра
Энергия единичного удара, Дж	A	900
Частота ударов, Гц	i	900
Удельный расход воздуха, м³/Дж	q_v	$3{,}5 \cdot 10^{-5}$
Давление сжатого воздуха, Па	$p_{\text{О}}$	$6 \cdot 10^5$
Скорость соударения ударника с инструментом, м/с	u	8
Коэффициент отскока	$k_{\text{О}}$	0,2
Газовая постоянная, Дж/(кг·К)	R	287

$\theta_{\text{АА}}$, $\theta_{\text{С}}$, $\theta_{\text{ТП}}$, $\theta_{\text{ДП}}$, $\theta_{\text{Т}}$, θ_3, $\theta_{\text{А}}$, θ_2, $\theta_{\text{ЗП}}$, θ_1, $\theta_{\text{ПП}}$ — температура воздуха в атмосфере, сети, камерах с объемами $V_{\text{ТП}}$, $V_{\text{ДП}}$, $V_{\text{Т}}$, V_3, $V_{\text{А}}$, V_2, $V_{\text{ЗП}}$, V_1, $V_{\text{ПП}}$;

$\varphi_{\text{АА}}$, $\varphi_{\text{С}}$, $\varphi_{\text{ТП}}$, $\varphi_{\text{ДП}}$, $\varphi_{\text{Т}}$, φ_3, $\varphi_{\text{А}}$, φ_2, $\varphi_{\text{ЗП}}$, φ_1, $\varphi_{\text{ПП}}$ — коэффициенты бародинамического процесса в атмосфере, сети, в камерах с объемами $V_{\text{ТП}}$, $V_{\text{ДП}}$, $V_{\text{Т}}$, V_3, $V_{\text{А}}$, V_2, $V_{\text{ЗП}}$, V_1, $V_{\text{ПП}}$;

$\Omega_{\text{АА}}$, $\Omega_{\text{С}}$, $\Omega_{\text{ТП}}$, $\Omega_{\text{ДП}}$, $\Omega_{\text{Т}}$, Ω_3, $\Omega_{\text{А}}$, Ω_2, $\Omega_{\text{ЗП}}$, Ω_1, $\Omega_{\text{ПП}}$ — коэффициенты термодинамического процесса в атмосфере, сети, в камерах с объемами $V_{\text{ТП}}$, $V_{\text{ДП}}$, $V_{\text{Т}}$, V_3, $V_{\text{А}}$, V_2, $V_{\text{ЗП}}$, V_1, $V_{\text{ПП}}$;

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

$S_{\text{У}}$, $m_{\text{У}}$, $L_{\text{У}}$ — рабочая диаметральная площадь, масса и длина между отсекающими кромками ($q - a$) ударника;

$m_{\text{К}}$ — масса корпуса;

$k_{\text{У}}$, $k_{\text{К}}$ — коэффициенты отскока ударника и корпуса от буртика рабочего инструмента;

$\left(\dfrac{dx_{\text{У}}}{dt}\right)_{\text{О}}$, $\left(\dfrac{dx_{\text{У}}}{dt}\right)_{\text{У}}$ — скорости отскока и удара ударника;

$\left(\dfrac{dx_{\text{К}}}{dt}\right)_{\text{О}}$, $\left(\dfrac{dx_{\text{К}}}{dt}\right)_{\text{У}}$ — скорость отскока и соударения корпуса с буртиком рабочего инструмента;

$F_{\text{Н}}$ — усилие нажатия на корпус молота;

$d^2x_{\text{У}}/dt^2$, $d^2x_{\text{К}}/dt^2$ — ускорения движения ударника и корпуса;

a, b, c, d, e, f, q, h, j, n, m — геометрические размеры длин между характерными отсекающими кромками.

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

Ограничения для φ_j и φ_i —

$$\varphi_j \equiv \varphi_i = \left| \begin{array}{l} 0{,}5283 > P_i / P_j \\ 0{,}5283 \le P_i / P_j \\ 0{,}5283 > P_i / P_j \\ 0{,}5283 \le P_i / P_j \end{array} \right| \begin{array}{c} P_i \Theta_i^{1/2} \cdot 0{,}2588, \\ P_i \Theta_i^{1/2} ((P_i / P_j)^{2/k} - (P_i / P_j)^{(k+1)/k})^{1/2}, \\ P_j \Theta_j^{1/2} \cdot 0{,}2588, \\ P_j \Theta_j^{1/2} ((P_j / P_i)^{2/k} - (P_j / P_i)^{(k+1)/k})^{1/2}. \end{array}$$

Ограничения для Ω_i и Ω_j —

$$\Omega_j \equiv \Omega_i = \left| \begin{array}{l} \varphi_i > 0 \\ \varphi_i \le 0 \\ \varphi_j > 0 \\ \varphi_j \le 0 \end{array} \right| \begin{array}{c} k-1, \\ k-\Theta_i/\Theta_j, \\ k-1, \\ k-\Theta_j/\Theta_i. \end{array}$$

Ограничения для $x_У$ и $x_К$ —

$$\left(\frac{dx_У}{dt}\right)_О = -k_У\left(\frac{dx_У}{dt}\right)_У \text{ при } x_У \le 0,$$

$$\left(\frac{dx_К}{dt}\right)_О = -k_К\left(\frac{dx_К}{dt}\right)_У \text{ при } x_К \le 0.$$

Ограничения для координаты выпуска воздуха из камеры холостого хода —

$$\omega_{АТ} = \left| \begin{array}{l} 0 < x_У < d \\ d < x_У \le e \\ e < x_У \end{array} \right| \begin{array}{c} \omega_{АТ} = 0, \\ \omega_{АТ} = 0{,}5\max\omega_{АТ}, \\ \omega_{АТ} = \max\omega_{АТ}, \end{array}$$

где $\max\omega_{АТ} = (e-d)^2y^2$; y — размер квадрата площади $\omega_{АТ}$.

Ограничения для координат перепуска воздуха в камеру холостого хода из камер рабочего хода при $\omega_Р = \text{const}$ и $\omega_Т = \text{const}$ —

$$\omega_Х = \left| \begin{array}{l} 0 < x_У < c \\ 0 < x_У \le c \\ x_У \ge c \end{array} \right| \begin{array}{c} \omega_Х = \max\omega_Х, \\ \omega_Х = 0{,}5\max\omega_Х, \\ \omega_Х = 0. \end{array}$$

После обозначений на расчетной схеме уточним ограничения по рис. 2.

Бародинамическая составляющая рабочего процесса для камер рабочего хода —

$$\begin{cases} \dfrac{dP_{ТП}}{dt} = \dfrac{k}{V_{ТП}}[W(\omega_С\varphi_С - \omega_Р\varphi_Р - \omega_{ДП}\varphi_{ДП})], \\ \dfrac{dP_{ДП}}{dt} = \dfrac{k}{V_{ДП}}[W(\omega_{ДП}\varphi_{ДП} - \omega_Т\varphi_Т - \omega_А\varphi_А)], \\ \dfrac{dP_2}{dt} = \dfrac{k}{((V_2+V_А+V_3+V_Т)-x_УS_У)}\left[W(\omega_Р\varphi_Р + \omega_Т\varphi_Т + \omega_А\varphi_А) + P_2\dfrac{dx_У}{dt}S_У\right], \\ \dfrac{dP_А}{dt} = \dfrac{k}{((V_А+V_3+V_Т)-x_УS_У)}\left[W(\omega_Р\varphi_Р + \omega_Т\varphi_Т + \omega_А\varphi_А) + P_А\dfrac{dx_У}{dt}S_У\right], \\ \dfrac{dP_3}{dt} = \dfrac{k}{((V_3+V_Т)-x_УS_У)}\left[W(\omega_Р\varphi_Р + \omega_Т\varphi_Т) + P_3\dfrac{dx_У}{dt}S_У\right], \\ \dfrac{dP_Т}{dt} = \dfrac{k}{(V_Т - x_УS_У)}\left[W(\omega_Р\varphi_Р + \omega_Т\varphi_Т) + P_Т\dfrac{dx_У}{dt}S_У\right]. \end{cases} \quad (1)$$

Бародинамическая составляющая рабочего процесса для камер холостого хода —

$$\begin{cases} \dfrac{dP_{\text{ПП}}}{dt} = \dfrac{k}{(V_{\text{ПП}} + x_{\text{У}} S_{\text{У}})}\left[W(\omega_{\text{ПП}}(x_{\text{У}})\varphi_{\text{ПП}}) - P_{\text{ПП}}\dfrac{dx_{\text{У}}}{dt}S_{\text{У}}\right], \\ \dfrac{dP_1}{dt} = \dfrac{k}{((V_{\text{ПП}} + V_1) + x_{\text{У}} S_{\text{У}})}\times \\ \qquad \times\left[W(\omega_{\text{ЗП}}(x_{\text{У}})\varphi_{\text{ЗП}} - \omega_{\text{АТ}}(x_{\text{У}})\varphi_{\text{АТ}}) - P_{\text{ПП}}\dfrac{dx_{\text{У}}}{dt}S_{\text{У}}\right], \\ \dfrac{dP_{\text{ЗП}}}{dt} = \dfrac{k}{((V_{\text{ПП}} + V_1 + V_{\text{ЗП}}) + x_{\text{У}} S_{\text{У}})}\times \\ \qquad \times\left[W(\omega_{\text{ЗП}}(x_{\text{У}})\varphi_{\text{ЗП}} - \omega_{\text{АТ}}(x_{\text{У}})\varphi_{\text{АТ}}) - P_{\text{ЗП}}\dfrac{dx_{\text{У}}}{dt}S_{\text{У}}\right]. \end{cases} \tag{2}$$

Термодинамическая составляющая рабочего процесса для камер рабочего хода —

$$\begin{cases} \dfrac{d\theta_{\text{ТП}}}{dt} = \dfrac{\theta_{\text{ТП}}}{P_{\text{ТП}}V_{\text{ТП}}}[W(\omega_{\text{С}}\varphi_{\text{С}}\Omega_{\text{С}} - \omega_{\text{Р}}\varphi_{\text{Р}}\Omega_{\text{Р}} - \omega_{\text{ДП}}\varphi_{\text{ДП}}\Omega_{\text{ДП}})], \\ \dfrac{d\theta_{\text{ДП}}}{dt} = \dfrac{\theta_{\text{ДП}}}{P_{\text{ДП}}V_{\text{ДП}}}[W(\omega_{\text{ДП}}\varphi_{\text{ДП}}\Omega_{\text{ДП}} - \omega_{\text{Т}}\varphi_{\text{Т}}\Omega_{\text{Т}} - \omega_{\text{А}}\varphi_{\text{А}}\Omega_{\text{А}})], \\ \dfrac{d\theta_2}{dt} = \dfrac{\theta_2}{P_2((V_2 + V_{\text{А}} + V_3 + V_{\text{Т}}) - x_{\text{У}} S_{\text{У}})}\times \\ \qquad \times\left[W(\omega_{\text{Р}}\varphi_{\text{Р}}\Omega_{\text{Р}} + \omega_{\text{Т}}\varphi_{\text{Т}}\Omega_{\text{Т}} + \omega_{\text{А}}\varphi_{\text{А}}\Omega_{\text{А}}) + (k-1)P_2\left(\dfrac{dx_{\text{У}}}{dt}\right)S_{\text{У}}\right], \\ \dfrac{d\theta_{\text{А}}}{dt} = \dfrac{\theta_{\text{А}}}{P_{\text{А}}((V_{\text{А}} + V_3 + V_{\text{Т}}) - x_{\text{У}} S_{\text{У}})}\times \\ \qquad \times\left[W(\omega_{\text{Р}}\varphi_{\text{Р}}\Omega_{\text{Р}} + \omega_{\text{Т}}\varphi_{\text{Т}}\Omega_{\text{Т}} + \omega_{\text{А}}\varphi_{\text{А}}\Omega_{\text{А}}) + (k-1)P_{\text{А}}\left(\dfrac{dx_{\text{У}}}{dt}\right)S_{\text{У}}\right], \\ \dfrac{d\theta_3}{dt} = \dfrac{\theta_3}{P_3((V_3 + V_{\text{Т}}) - x_{\text{У}} S_{\text{У}})}\times \\ \qquad \times\left[W(\omega_{\text{Р}}\varphi_{\text{Р}}\Omega_{\text{Р}} + \omega_{\text{Т}}\varphi_{\text{Т}}\Omega_{\text{Т}}) + (k-1)P_3\left(\dfrac{dx_{\text{У}}}{dt}\right)S_{\text{У}}\right], \\ \dfrac{d\theta_{\text{Т}}}{dt} = \dfrac{\theta_{\text{Т}}}{P_{\text{Т}}(V_{\text{Т}} - x_{\text{У}} S_{\text{У}})}\times \\ \qquad \times\left[W(\omega_{\text{Р}}\varphi_{\text{Р}}\Omega_{\text{Р}} + \omega_{\text{Т}}\varphi_{\text{Т}}\Omega_{\text{Т}}) + (k-1)P_{\text{Т}}\left(\dfrac{dx_{\text{У}}}{dt}\right)S_{\text{У}}\right]. \end{cases} \tag{3}$$

Термодинамическая составляющая рабочего процесса для камер холостого хода —

$$\begin{cases} \dfrac{d\theta_{ПП}}{dt} = \dfrac{\theta_{ПП}}{(V_{ПП} - x_У S_У)}\left[W(\omega_{ПП}(x_У)\varphi_{ПП}\Omega_{ПП}) + (k-1)P_{ПП}\left(\dfrac{dx_У}{dt}\right)S_У\right], \\ \dfrac{d\theta_1}{dt} = \dfrac{\theta_1}{((V_{ПП} + V_1) + x_У S_У)} \times \\ \qquad \times\left[W(\omega_{ЗП}(x_У)\varphi_{ЗП}\Omega_{ЗП} - \omega_{АТ}(x_У)\varphi_{АТ}\Omega_{АТ}) - (k-1)P_1\left(\dfrac{dx_У}{dt}\right)S_У\right], \\ \dfrac{d\theta_{ЗП}}{dt} = \dfrac{\theta_{ЗП}}{((V_{ПП} + V_1 + V_{ПП}) + x_У S_У)} \times \\ \qquad \times\left[W(\omega_{ЗП}(x_У)\varphi_{ЗП}\Omega_{ЗП} - \omega_{АТ}(x_У)\varphi_{АТ}\Omega_{АТ}) - (k-1)P_{ЗП}\left(\dfrac{dx_У}{dt}\right)S_У\right]. \end{cases} \quad (4)$$

Баромеханическая составляющая рабочего процесса —

$$\begin{cases} \dfrac{d^2 x_У}{dt^2} = (P_{ПП}S_У + P_{ЗП}S_У - P_2 S_У - P_А S_У - P_3 S_У - P_Т S_У)/m_У & \text{при } x_У > 0, \\ \dfrac{d^2 x_К}{dt^2} = (P_{ПП}S_У + P_{ЗП}S_У - P_2 S_У - P_А S_У + F_Н - P_3 S_У - P_Т S_У)/m_К & \text{при } x_К > 0. \end{cases} \quad (5)$$

В системах уравнений (1)–(5) коэффициент расхода μ_i воздуха через каналы площадью ω_i приняты равными единице. После расчета рабочих площадей ω_i они уточняются расчетом или продувкой [4].

В табл. 2, 3 коэффициенты расхода воздуха рассчитаны по [4]. В формулах, приведенных в табл. 2, обозначены:

z_{Pi}, z_{Xi} — количество дросселей впуска в камеру рабочего и холостого ходов;

μ_{Pi}, μ_{Xi} — коэффициенты расходов дросселей впуска в камеру рабочего и холостого ходов, определяемые продувкой или расчетом [4];

$\rho_М$ — плотность материала ударника;

$S_{ОК}$ — площадь отверстия в ударнике, равная площади диаметрального сечения трубки;

δ — толщина трубки, м.

Таблица 2. **Формулы и результаты расчета пневмоударного механизма [3]**

Параметр	Расчетная формула	Величина параметра
Расчетная площадь сплошного ударника, м^2	$S_У = 29{,}8iA/up_О\varepsilon$ (ε см. табл. 3)	0,0188
Диаметр сплошного ударника, м	$D_У = 2(S_У/\pi)^{1/2}$	0,1586
Расчетная площадь кольцевого ударника, м^2	$S_{УК} = S_У$	0,0188
Диаметр кольцевого ударника, м	$D_{УК} = 2((S_У + S_{УК})/\pi)^{1/2}$	0,1586
Суммарный объем камер со стороны рабочего хода, м^3	$V_Р = \upsilon A_У/p_О$ (υ см. табл. 3)	0,0084

Окончание табл. 2

Параметр	Расчетная формула	Величина параметра
Суммарная площадь проходных сечений дросселей впуска в камеры рабочего хода, м^2	$\omega_P = 0{,}336 i V_P \tau \mu_P$ ($\mu_P = 0{,}86$; τ см. табл. 3)	0,000226
Диаметр дросселя впуска в камеру рабочего хода, м	$d_{Pi} = 2(\omega_P/\mu_{Pi} z_i p_O)$ ($\mu_{Pi} \neq$ const)	0,01697
Суммарный объем камер со стороны холостого хода, м^3	$V_X = V_P/\lambda = \upsilon A_У/p_O\lambda$ (λ см. табл. 3)	0,0012
Суммарная площадь проходных сечений дросселей впуска в камеры холостого хода, м^2	$\omega_X = \alpha\omega_P V_X/ V_P\mu_X$ ($\mu_X = 0{,}68$; α см. табл. 3)	0,000142
Диаметр дросселя впуска в камеру холостого хода, м	$d_{Xi} = 0{,}034\alpha(iA_У/ p_O\mu_{Xi}z_X)^{1/2}$	0,0135
Масса сплошного ударника, кг	$m_У = 2A_У/u_У^2$	28,125
Масса кольцевого ударника, кг	$m_{УК} = m_У$	28,125
Длина сплошного ударника, м	$L_У = m_У/\rho_M S_У$	0,1906
Длина кольцевого ударника, м	$L_{УК} = m_У/\rho_M(S_У - S_{ОК})$	
Площадь диаметрального сечения канала выпуска отработавшего воздуха, м^2	$\omega_в = (12\ldots15)\omega_P = (0{,}21\ldots0{,}26)iA_У/p_O$	
Диаметр канала выпуска, м	$d_в = 2(\omega_в/\pi\mu_в) = (0{,}42\ldots0{,}52)iA_У/p_O\mu_в$	
Диаметр сквозного отверстия в ударнике (по ходовой посадке), м	$d_{ок} = d_в + 2\delta$	
Координата начала дросселя выпуска воздуха из камеры холостого хода, м	$H_X = h_X(V_P/S_У)$ (h_X см. табл. 3)	0,007

Таблица 3. **Значения безразмерных коэффициентов в зависимости от коэффициента отскока k_O**

k_O	λ	ε	τ	υ	α	h_X
0,00	7	2,60	2,5	5,45	3–4	0,15
0,20	7	2,67	2,2	5,60	3–4	0,15
0,30	7	2,85	2,8	5,40	3–4	0,15

Ожидаемые величины расхода воздуха G_V в зависимости от заданных параметров представлены в табл. 4. Расход воздуха на 1 Гц можно подсчитать делением G_V на i, что является предпочтительным критерием оценки экономичности пневмоударного механизма.

Заключение. Перепуск воздуха между рабочими камерами синтезированного пневмоударного механизма позволил упростить его устройство и повысить надежность. Кроме того, расположение камер перепуска со стороны полости рабочего хода и выпуск отработавшего воздуха только через каналы холостого хода дает возможность сократить непроизводительный расход сжатого воздуха для механизма в целом.

Таблица 4. **Результаты расчета расхода воздуха G_V в зависимости от заданных значений A = 500, 700, 900, 1000 Дж; p_O = 0,6 МПа = 6 бар**

Расчет: $G_V = q_V \cdot 10^{-5} \cdot iA$, м³/с	i – частота ударов, Гц									
	4	6	8	9	10	12	14	16	18	20
$1 \cdot 10^{-5} \cdot 500$	0,02	0,03	0,04	0,045	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
$1 \cdot 10^{-5} \cdot 700$	0,028	0,042	0,056	0,063	0,07	0,084	0,098	0,112	0,126	0,14
$1 \cdot 10^{-5} \cdot 1000$	0,04	0,06	0,08	0,09	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2
$1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 500$	0,03	0,045	0,06	0,069	0,075	0,09	0,105	0,12	0,135	0,15
$1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 700$	0,042	0,063	0,084	0,095	0,105	0,126	0,147	0,168	0,189	0,21
$1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1000$	0,06	0,09	0,12	0,135	0,15	0,18	0,21	0,24	0,27	0,3
$2 \cdot 10^{-5} \cdot 500$	0,04	0,06	0,08	0,09	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2
$2 \cdot 10^{-5} \cdot 700$	0,056	0,084	0,112	0,126	0,14	0,168	0,196	0,224	0,252	0,28
$2 \cdot 10^{-5} \cdot 900$	0,072	0,108	0,144	0,162	0,18	0,216	0,252	0,288	0,324	0,36
$2 \cdot 10^{-5} \cdot 1000$	0,08	0,12	0,16	0,18	0,2	0,24	0,28	0,32	0,36	0,4
$2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 500$	0,05	0,075	0,1	0,113	0,125	0,15	0,175	0,2	0,225	0,25
$2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 700$	0,07	0,105	0,14	0,158	0,175	0,21	0,245	0,28	0,315	0,35
$2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 900$	0,09	0,135	0,18	0,203	0,225	0,27	0,315	0,36	0,405	0,45
$2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1000$	0,1	0,15	0,2	0,225	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
$3 \cdot 10^{-5} \cdot 500$	0,06	0,09	0,12	0,135	0,15	0,18	0,21	0,24	0,27	0,3
$3 \cdot 10^{-5} \cdot 700$	0,084	0,126	0,168	0,189	0,21	0,252	0,294	0,336	0,378	0,42
$3 \cdot 10^{-5} \cdot 900$	0,108	0,162	0,216	0,243	0,27	0,324	0,378	0,432	0,486	0,54
$3 \cdot 10^{-5} \cdot 1000$	0,12	0,18	0,24	0,27	0,3	0,36	0,42	0,48	0,54	0,6
$3,5 \cdot 10^{-5} \cdot 500$	0,07	0,105	0,14	0,158	0,175	0,21	0,245	0,28	0,315	0,35
$3,5 \cdot 10^{-5} \cdot 700$	0,098	0,147	0,196	0,221	0,245	0,294	0,343	0,392	0,441	0,49
$3,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1000$	0,14	0,21	0,28	0,315	0,35	0,42	0,49	0,56	0,63	0,7
$4 \cdot 10^{-5} \cdot 500$	0,08	0,12	0,16	0,18	0,2	0,24	0,28	0,32	0,36	0,4
$4 \cdot 10^{-5} \cdot 700$	0,112	0,168	0,224	0,252	0,28	0,336	0,392	0,448	0,504	0,56
$4 \cdot 10^{-5} \cdot 1000$	0,16	0,24	0,32	0,36	0,4	0,48	0,56	0,64	0,72	0,8

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: моногр. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2008. 376 с.
3. Петреев А.М., Абраменков Э.А., Клушин Н.А., Липин А.А. Методика расчета и рекомендации по доводке дроссельного пневмоударного механизма // Ручные пневматические машины ударного действия: сб. тр. Новосибирск: ИГД СО РАН СССР, 1979. С. 53–60.
4. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975. 559 с.

***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
***Гайдучик Мария Ивановна**, студ.*
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
***Гэндэн Баттулга**, асп.*
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
***Малышев Максим Сергеевич**, студ.*
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
***Абраменков Эдуард Александрович**, д-р техн. наук, проф.*
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 17.08.15

Dmitriev Mihail Petrovich, post-graduate student,
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Abramenkov Dmitry Eduardovich, DSc, professor,
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia
Gaiduchick Mariya Ivanovna, student,
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Genden Battulga, post-graduate student,
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Malyshev Maksim Sergeevich, student,
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 CHARGING AND BREAKING CHAMBERS ANDITS PHYSICO-MATHEMATICAL DESCRIPTION

Considered air percussion mechanism with bypass chambers on idle chamber side.

Keywords: front luggage idle, back luggage idle, breaking luggage stroke, charging luggage stroke.

REFERENCES

1. Abramenkov E.A., Abramenkov D.E. Pnevmaticheskie mekhanizmy mashin udarnogo deystviya [Pneumatic mechanisms of impact machines, inkjet, without spool, valveless: Ref. manual]. Novosibirsk, Publishing house Novosib. University, 1993, 430 p. (rus.)
2. Kutumov A.A., Abramenkov D.E., Abramenkov E.A. Navesnye pnevmaticheskie moloty dlya razrabotki merzlykh gruntov: monogr. [Mounted pneumatic hammers for frozen ground excavation: monogr]. Novosibirsk: NGASU (Sibstrin), 2008, 376 p. (rus.)

3. Petreev A.M., Abramenkov E.A., Klushin N.A., Lipin A.A. Metodika rascheta i rekomendatsii po dovodke drossel'nogo pnevmoudarnogo mekhanizma [Methods of calculating and guidelines for fine-tuning of the throttle pneumatic mechanisms]. Ruchnye pnevmaticheskie mashiny udarnogo deystviya: sb. tr. [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 (rus.)
4. Idelchik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [The handbook of hydraulic resistance]. M., Mechanical Engineering, 1975, 559 p. (rus.)

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

УДК 712.253 : 534.835/.836

А.В. ГОРОДКОВ, Н.А. САМОХОВА

АКУСТИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕКРЕАЦИОННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ГОРОДА И ЕГО ОПТИМИЗАЦИЯ СРЕДСТВАМИ ОЗЕЛЕНЕНИЯ ПЕРИФЕРИЙНЫХ ЗОН

Рассматривается проблема формирования на территориях городских зеленых зон негативного акустического режима, связанного с автотранспортным шумом. Дана краткая характеристика исследуемых объектов, определены размеры зон акустического дискомфорта на рекреационных территориях. Приведены данные о шумозащитной эффективности полос зеленых зон. На картах шума показан результат предложенных защитных мероприятий по экореконструкции территорий, способствующий оптимизации среды по фактору шума.

Ключевые слова: городские зеленые зоны, парки, скверы, автотранспортный шум, акустический режим.

Качество среды городских рекреационных зеленых зон характеризуется сложной ситуацией в экологическом и гигиеническом отношении. Образование дискомфортных зон и возрастание площадей, не отвечающих требованиям санитарных норм по важнейшим экофакторам среды, привели в значительном числе случаев к невозможности использования отдельных функциональных территорий различных категорий парков по прямому назначению (тихий отдых, организация детского досуга и т.д.). Эта тревожная тенденция характерна для большинства крупных и крупнейших городов страны.

Территории объектов культурного озеленения (скверы, городские сады, малые парки) площадью менее 10 га при низкой степени средозащитного влияния озеленения, как правило, попадают в зону закономерного образования постоянных фоновых загрязнений среды [1]. Парки и скверы в значительной степени подвержены негативному воздействию такого техногенного фактора, как шум автомобильного транспорта, вклад которого составляет до 80 % от общего числа источников городского шума.

Увеличение интенсивности магистрального движения привело к тому, что средний уровень шума на улицах больших городов достигает 70–90 дБА, что намного превышает санитарную норму. Очевидно, такая ситуация складывается вполне закономерно, так как территории парков и садов являются неотъемлемой частью городской инфраструктуры, качество которой в значительной степени снижено и в большинстве случаев находится за пределами гигиенических критериев. Изложенное с достаточной степенью убедительно-

© Городков А.В., Самохова Н.А., 2015

сти обосновывает необходимость совершенствования системы проектирования природных элементов рекреационных территорий, способных сформировать активную долю участия в комплексе средозащитных и природоохранных мероприятий.

Повышение оздоровительной и в целом градостроительной эффективности парков и садов представляет собой достаточно сложную задачу. Рассматривая здесь только средозащитный аспект проблемы, следует подчеркнуть, что расположение большинства парков в структуре крупных городов не способствует формированию на их территориях комфортной, оздоровляющей среды. Негативному воздействию в значительной степени подвержены парки со стороны техногенных факторов — внешнего и внутреннего акустического дискомфорта, а также загрязнения атмосферы территорий участками транспортных магистралей и шлейфами распространения загрязненного воздуха от стационарных промышленных источников и т.д.

Характерно, что для парков с малой площадью территорий (15–10 га и менее) при низкой степени средозащитного влияния озеленения закономерно образование постоянных фоновых акустических загрязнений среды достаточно высокого уровня (45–50 дБА), также негативно действующего на человека. Решению проблем акустического режима в городских условиях посвящены труды таких ученых, как М.М. Болховитина, Г.П. Берфина, Ю.И. Шнейдер, А.А. Агасьянц, А.В. Городков, И.И. Клюкина, В.В. Цыганков и др. Однако в большинстве случаев ими были получены данные для транспортно-магистральных территорий застройки городов. В отношении рекреационных территорий города таких данных недостаточно.

Цель работы — оценка состояния акустического режима парковых зон и исследование шумозащитной эффективности зеленых насаждений по фактору шумового загрязнения прилегающих территорий. В задачи исследования входит: установление закономерностей планировочного размещения объектов рекреации по отношению к источникам загрязнения; построение карт шума для каждого участка и выявление закономерностей распространения шума на территориях парков с оценкой степени акустического дискомфорта по площадям, находящимся в зоне превышения установленных санитарных норм; экспериментальная оценка шумозащитных качеств линейно-полосных структур зеленых насаждений как основного мероприятия по снижению уровня распространяющегося шума.

В ходе исследований дендрологического состава зеленых насаждений объектов рекреации выявлено, что «зеленый» фонд парков и скверов составляют такие виды, как липа мелколистная, береза, конский каштан обыкновенный, клен остролистный, тополь черный, ель европейская, сосна обыкновенная, туя западная. Акустический режим территорий исследовали в вегетационные периоды 2013–2014 гг. Каждый исследуемый участок разбивали на сетки прямоугольников со сторонами 20, 30, 40 или 50 м, в зависимости от площади территории. В углах каждого прямоугольника были намечены точки, в которых проводили измерения. Одновременно осуществляли подсчет транспортного потока прилегающей автомагистрали в течение 30 мин, с последующим пересчетом за 1 ч.

Установлено, что наибольшую автотранспортную нагрузку испытывают участки, расположенные на пересечении нескольких магистралей. Пиковая интенсивность транспортного потока фиксирована на уровне 5000 авт./ч. В других планировочных районах города интенсивность автомобильного потока составляет от 600 до 3000 авт./ч.

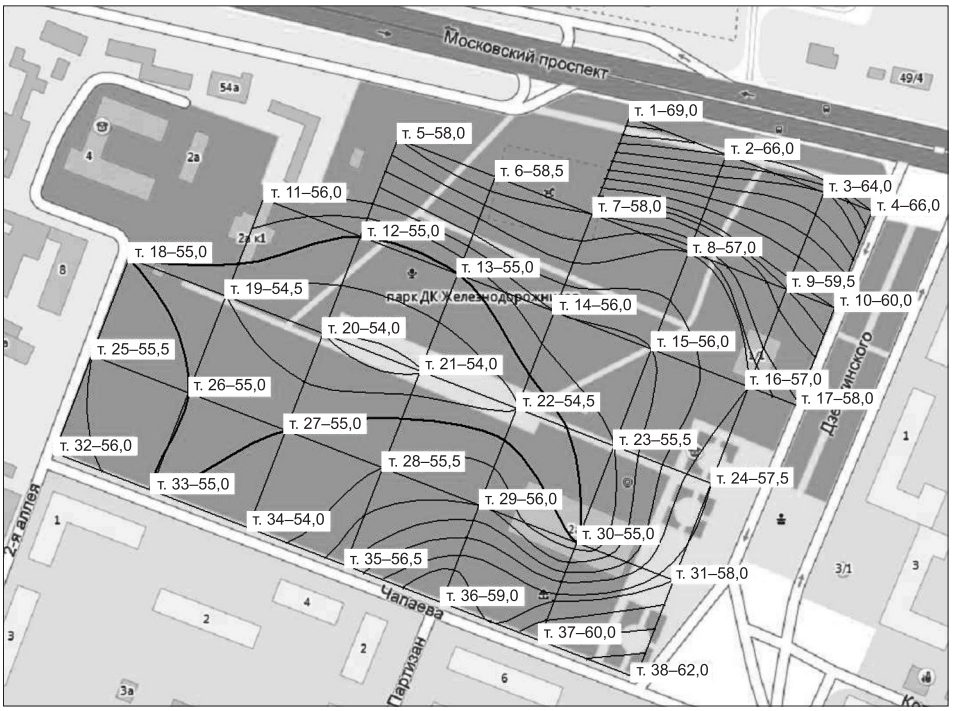
С использованием полученных при помощи шумомера данных был произведен расчет эквивалентного уровня звука для всех точек, в которых осуществлялись измерения. Результаты расчета послужили основой для построения карты шума для каждого участка. В табл. 1 приведена характеристика нескольких зеленых зон по фактору автотранспортного шумового загрязнения.

Таблица 1. **Характеристика некоторых территорий городских зеленых зон по фактору акустического загрязнения автотранспортными средствами (на примере г. Брянска)**

Объект — площадь, га	Интенсивность потока транспорта на магистралях, авт./ч	Площадь территории, % (га), с уровнем шума, дБА	
		≤55,0	≥55,0
Парк А.К. Толстого — 3,0	Ул. Горького — 1204	65,8 (2,0)	34,2 (1,0)
Сквер Энергетиков — 1,0	Ул. Советская — 1442	—	100 (1,0)
Сквер Ф.И. Тютчева — 0,7	Пр-т Ленина — 1858, ул. Фокина — 1632	2 (0,1)	98 (0,69)
Сквер И.К. Гайдукова — 0,9	Ул. Красноармейская — 2550	18,3 (0,2)	81,7 (0,7)
Парк «Майский» — 4,0	Ул. Майской Стачки — 680	70 (2,8)	30 (1,2)
Сквер Металлургов — 1,9	Ул. Литейная — 2372	—	100 (1,9)
Сквер «Пролетарский» — 2,4	Ул. Ульянова — 2896	12,4 (0,3)	87,6 (2,1)
Парк «Юность» — 3,0	Ул. Никитина — 1418, ул. Пушкина — 834	9,5 (0,3)	90,5 (2,7)
Парк Железнодорожников — 5,0	Пр-т Московский — 4895, ул. Дзержинского — 1635	24,3 (1,3)	75,7 (3,7)
Сквер «Вечный огонь» — 0,7	Ул. Дзержинского — 923, ул. Красных Партизан — 139	25,4 (0,2)	74,6 (0,5)

Анализируя данные табл. 1, отметим следующее: по фактору акустического загрязнения большая часть территорий объектов находится в зоне дискомфорта, причем на некоторых уровень шума полностью превышает установленную норму в 55,0 дБА[1]. В качестве примера приведем карту шумового загрязнения, позволяющую проследить закономерности формирования акустического климата территории паркового массива (рис. 1). Анализ карты показывает, что уровень шума на границах территории с транспортными магистралями составляет 56–69 дБА. Подавляющая часть территории (75,7 % — 3,7 га) находится в зоне акустического дискомфорта, что становится закономерным следствием примыкания к объекту четырех автомагистралей, с интенсивным движением транспортного потока. На территории с повышенным уровнем шума расположены детские игровые площадки, аллеи транзитного движения пешеходов, места для

[1] СНиП 23-03–2003. Защита от шума: взамен СНиП II-12–77: введ. 2004-01–01 / Госстрой России. М.: ФГУП ЦПП, 2004. 36 с.



т. 3–64,0 – эквивалентный уровень звука в точке измерений, дБА; ——— изолиния 55 дБА

Рис. 1. Карта шума парка Железнодорожников в часы «пик»

кратковременного отдыха. Участок с допустимым уровнем шума (24,3 % — 1,3 га) наиболее удален от оживленных автомагистралей. Таким образом, «работу» буферных участков средозащитного озеленения парка следует считать не эффективной и не способной снизить исходные уровни шума. При этом зеленые насаждения не отвечают требованиям шумозащиты.

С целью оценки шумозащитных качеств зеленых насаждений проведены экспериментальные наблюдения в полосных структурах зеленых насаждений с искусственным источником шума на основе схемы синхронной оценки уровня шума непосредственно за и перед полосой [2]. Сопоставление данных измерений с «открытым» участком позволило оценить вклад полос озеленения в снижение уровня шума. При этом уменьшение уровней шума, вызванное атмосферным поглощением, было незначительным, так как анализируемые расстояния не превышали 50 м. Ширина исследованных полос составляла от 15 до 30 м, а структура, дендрологический состав и конструкция посадок удовлетворяли требованиям создания наивысшей степени биомассы и плотности насаждения. Подобные методические подходы использованы в работах Г.П. Берфиной, А.В. Городкова и др.

В табл. 2 показаны данные натурных исследований и эскизы поперечных сечений полос зеленых насаждений. Полученные в эксперименте данные позволяют выявить влияние периметральных полос, шириной до 15–20 м, расположенных со стороны прилегающих магистралей, на перераспределение уровней шума на всей территории парков. Отметим, что в планировке парковой территории имеется возможность для реконструк-

Таблица 2. **Данные натурных исследований и эскизы поперечных сечений полос зеленых насаждений**

Эскиз поперечного сечения	Характеристика полосы	Ожидаемая эффективность в снижении уровня шума, дБА
	Рядовая посадка с шагом 5,0 м, ширина сечения 25 м, подкроновое пространство закрыто, смешанный видовой состав (40 % хвойных)	7,0–7,5
	Рядовая посадка с шагом 5,0 м, ширина сечения 35 м, подкроновое пространство закрыто, лиственный видовой состав	8,0
	Рядовая посадка с шагом 4,0 м, ширина сечения 15 м, подкроновое пространство закрыто, смешанный видовой состав (25 % хвойных)	3,0–3,5
	Рядовая посадка с шагом 4,5 м, ширина сечения 18 м, подкроновое пространство закрыто, лиственный видовой состав	5,0
	Свободная посадка, ширина сечения 15 м, подкроновое пространство закрыто, смешанный видовой состав (60 % хвойных)	2,5–3,5
	Рядовая посадка с шагом 4,5 м, ширина сечения 18 м, подкроновое пространство закрыто, лиственный видовой состав	3,0–4,0

ции периметральных насаждений в соответствии с требованиями шумозащиты.

На рис. 2 представлена карта шума, из которой видно, что акустические параметры парковой территории претерпевают существенное изменение. Значительно возрастает общая площадь, на которой не отмечаются превышения предельно допустимого уровня шума (до 80 %). В планировочных узлах парка, наиболее чувствительных к акустическому климату (зоны детского и тихого отдыха), также не наблюдается превышение уровня шума. Становится очевидным, что основной «каркас средозащиты», безусловно, должны составлять участки специальных приемов озеленения, функционально нацеленные на наивысшую степень реализации шумозащитных качеств, которые могут быть достигнуты при участии древесных видов

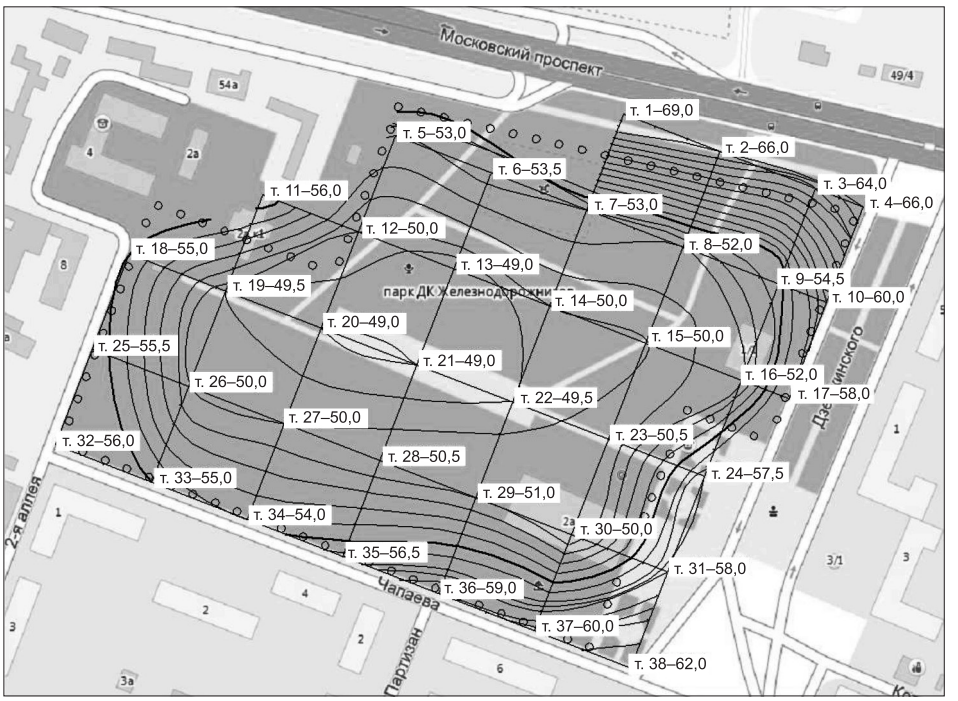


Рис. 2. Карта шума парка Железнодорожников с применением периметральной защитной полосы

с максимальным объемом фитомассы, имеющих общую плотную структуру. Снижение эффективности шумозащиты в зимний период должны компенсировать хвойные виды, введение которых в структуру парковых насаждений должно быть обязательным.

Наблюдения за закономерностями снижения уровня шума в среде зеленых насаждений позволяют считать, что в малых парках основную роль в нормализации акустического режима должны играть периметрально-периферийные линейно-полосные структуры насаждений, изолирующие территорию от внешних источников шума. Буферный «экран» полос способен снизить уровни шума до нормативных пределов. Не менее важны и защитные полосы локально ограниченных зон парков (детские площадки). Принципы проектирования парковых пространств должны быть дополнены категориями средозащитных зеленых насаждений, такими как защитные участки открытых пространств, насаждениями вдоль дорог и аллей, защитными полосами разграничения функциональных зон.

Разнообразие экологических условий, формирующихся в функциональных зонах парков, требует, безусловно, дифференцированного подхода к выбору средозащитных приемов озеленения территорий, который зависит от сложившейся градостроительной ситуации в районе размещения рекреационного массива. В этом случае учитывается характер прилегающей застройки и степень ее участия в защите от неблагоприятных факторов среды. Планировочная система парка должна корректироваться как по составу

и набору ее элементов средозащитного озеленения, так и по общей схеме зонирования территории.

Полученные в ходе натурно-экспериментальных исследований данные, свидетельствующие о реальной возможности оптимизации акустического режима территорий, позволяют рекомендовать использование в ландшафтном проектировании периферийных буферных участков шумозащитного озеленения в качестве основного элемента средозащиты парков и иных ландшафтно-рекреационных территорий городов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Городков А.В. Проектирование средозащитного озеленения в системе совершенствования экосреды парковых массивов // Изв. вузов. Строительство. 1999. № 6. С. 111–117.
2. Городков А.В. Архитектура, проектирование и организация культурных ландшафтов. СПб., Проспект Науки, 2013. 416 с.

***Городков Александр Васильевич**, д-р с.-х. наук, проф.; E-mail: avgorodkov@yandex.ru*
Брянский государственный инженерно-технологический университет
***Самохова Наталья Александровна**, асп.; E-mail: karpes-natalya@yandex.ru*
Брянский государственный инженерно-технологический университет

Получено после доработки 24.08.15

Gorodkov Aleksandr Vasil'evich, DSc, professor, Bryansk State University of Engineering and Technology, Russia
Samokhova Natal'ya Aleksandrovna, post-graduate student, Bryansk State University of Engineering and Technology, Russia

ACOUSTIC MODE OF CITY RECREATIONAL AREAS AND ITS OPTIMIZATION BY MEANS OF PLANTING OF GREENERY IN PERIPHERAL AREAS

This article reads the problem of negative acoustic impact in the territories of urban green areas. This impact is caused by motor transport noise. Below you can see a brief description of the objects under study. The sizes of acoustic discomfort territories on recreational areas were defined accurately. Also there is information about noise protection efficiency of green zone strips in this article. In the noise maps you can see the result of offered noise protective measures concerning ecological reconstruction of territories, conductive to environment optimization by the factor of noise.

Keywords: urban green areas, parks, squares, the noise from the cars, acoustic climate.

REFERENCES

1. Gorodkov A.V. Proektirovanie sredozashchitnogo ozeleneniya v sisteme sovershenstvovaniya ekosredy parkovykh massivov [Planning environmental landscaping in the system to improve the ecological environment park area]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction], 1999, No. 6, pp. 111–117 (rus.)
2. Gorodkov A.V. Arkhitektura, proektirovanie i organizatsiya kul'turnych landshaftov [Architecture, design and organization of cultural landscapes]. SPb., Prospect Nauki, 2013, 416 p. (rus.)

УДК 725.75

Н.Н. СТРОЕВА, Т.П. БАЦУНОВА

КЛАССИФИКАЦИЯ ВЕЛНЕС-ЦЕНТРОВ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ

Более 50 лет назад в США было введено понятие «велнес» (wellness). Оно дословно переводится как «хорошее самочувствие». Целью первых велнес-центров было восстановление морального и физического здоровья человека. Они появились на этапе бурного развития городов, как реакция на один из основных негативных факторов, нуждавшийся в нейтрализации — стресс. В дальнейшем он получил новое определение «городской невроз», который подразделяется на подвиды «синдром менеджера», «синдром городского одиночества» и ряд других. В последние десятилетия наблюдается устойчивая миграция населения в города и укрупнение последних. Тенденция усиления давления города на человека стимулировала развитие велнес-индустрии в целом. В Россию данное явление пришло порядка 25 лет назад. Однако ситуация как с точки зрения архитектуры, так и с точки зрения набора услуг представляла собой чаще всего простое копирование западных аналогов. В данной статье проанализированы велнес-центры в крупнейших городах России по их местоположению в городе. Согласно устоявшимся градостроительным категориям они территориально распределены по четырем основным типам городской среды. Приведены примеры архитектурных решений зданий велнес-центров, иллюстрирующие применение различных приемов, отличающих каждый из них.

Ключевые слова: велнес-центры, спа-комплексы, фитнес-клубы, рекреационные центры, архитектура, городская среда, классификация, пространство.

1. Актуальность и исходные данные. Нестабильная экономическая ситуация в стране, увеличение темпа жизни, нарастание социально-общественной ответственности человека с возрастом, еженедельное повторение привычных маршрутов следования, все эти факторы порождают высокую степень риска возникновения стрессов и заболеваний. Особенно эта проблема актуальна для крупных и крупнейших городов, где кроме вышеперечисленных аспектов дополнительную эмоциональную нагрузку создает большое количество жителей (около 10 000 жителей на 1 км^2)[1]. Это порождает нехватку личного пространства, которая вызывает неосознанный невроз, получивший название «невроз большого города». Все больше распространяется «синдром менеджера». Его суть заключается в постоянном возбужденно-напряженном состоянии относительно работы, стремление «сделать все самому и сразу». Симптомы: тревожный сон, постоянная усталость, которую не может снять даже сон, ощущение «незаменимости» на работе. Решением этих и других проблем могут стать велнес-центры.

В 1959 г. американский врач Хальберт Л. Данн ввел в практику понятие «велнес». Велнес включает в себя сферы фитнеса и спа, так как

[1] Департамент культуры города Москвы. Паспорт культурной жизни. Общая характеристика территории // Официальный сайт Министерства культуры Российской Федерации. М., 2015. URL: http://mkrf.ru/ministerstvo/pasp/ (дата обращения: 04.06.2015).

© Строева Н.Н., Бацунова Т.П., 2015

является понятием более широкого типа [1]. Подразумевается комплексное использование методик оздоровления, состоящих из диетологии, реабилитационных программ, корректировки психологического состояния, функционального тренинга, спа-сеансов и т.д.

Для анализа выбрано 25 городов Российской Федерации с наибольшим числом жителей, а также дополнительно Сочи и Калининград как населенные пункты, обладающие уникальными для страны природными условиями и территориальными ресурсами. Данные о численности населения взяты с информационного портала Федеральной службы государственной статистики. В качестве картографической базы и справочника организаций использована программа «2ГИС», версия 3.14.12 от 16.12.2014 с базами городов, актуальными на апрель 2015 г.

Советские исследователи социокультурных процессов в городах (А.В. Баранов, З.Н. Яргина, О.Н. Яницкий, Л.Б. Коган) выявили следующую дифференциацию городской среды: центр — срединная зона — периферийные районы [2]. В данной статье дополнительно введены пригородные районы — территории, находящиеся за чертой города и характеризующиеся естественной природной средой, с минимальным антропогенным воздействием.

Для наглядности приведем пример социально-пространственной дифференциации среды в Москве. К центру отнесена застройка по улицам Тверской, Покровке, Люсиновской, Кузнецкому мосту. Срединная зона — территории у станций метро «Аэропорт», «Сокол», «Текстильщики». Периферийными районами можно назвать Химки-Ховрино, Орехово-Борисово и т.п. (по Л.Б. Когану) [2]. Пригородные районы — Балашиха, Шишкино, Васильево.

2. Результаты анализа. В ходе анализа установлено, что количество велнес-центров не зависит от масштаба и населения города. Максимальное количество объектов (42) находится в Красноярске, который занимает 12-е место в списке крупнейших населенных пунктов (~1 млн человек). В Москве это число составляет 40 зданий, несмотря на 12 млн жителей. Подобная ситуация обусловлена несколькими причинами:

1. Понятие «велнес» набирает популярность, однако, большинство специалистов по-прежнему не могут оценить, какое местоположение в городе, образ здания и набор услуг должны соответствовать подобным учреждениям. Данным фактом пользуются владельцы спа-комплексов, фитнес-залов и салонов красоты. Немного расширяя ассортимент предоставляемых услуг, они добавляют к названию слово «велнес». Это иллюстрация формального подхода: суммирование функций в ограниченном диапазоне [3].

2. Одна из отличительных особенностей российского велнеса — элитарность. Маркер благосостояния, возможность причислить себя к некой ограниченной группе лиц. Подобный образ подачи часто приводит к отсутствию информации об организации в открытых источниках.

3. Система «2ГИС» — открытый, развивающийся проект с постоянно обновляющейся базой данных. Возможно, часть организаций не была внесена в анализируемую версию продукта.

Выявлены количественные показатели велнес-центров по четырем типам городской среды. Следует отметить, что не по каждому городу существуют

конкретные данные о границах подобных зон. В некоторых случаях применялся метод аналогии, где за основу выбиралось зонирование Москвы. Полученные результаты по 27 населенным пунктам сведены к общим показателям (таблица). Максимальное количество велнес-центров располагается в периферийной зоне (102 шт.), далее идет срединная зона (94 шт.), с небольшим отставанием — центральная (90 шт.), на последнем месте — пригородная (41 шт.). Данные соотношения не совпали с предполагаемыми результатами. Одной из важных частей велнеса является наличие природных пространств, озелененных территорий, что можно обеспечить только в пригородных зонах, где и ожидалось максимальное количество объектов [4]. Большая часть объектов оказалась в границах города. Поэтому для компенсации недостающих рекреационных пространств были использова-

Количество велнес-центров в крупнейших городах РФ

Город	Количество населения на 1 января 2014 г., чел.	Количество велнес-центров по типам городской среды [2], шт.				Общее количество велнес-центров, шт.
		центр	срединная зона	периферийный район	пригород	
Москва	12 108 257	4	10	18	8	40
Санкт-Петербург	5 131 942	9	14	7	4	34
Новосибирск	1 547 910	3	8	5	11	27
Екатеринбург	1 412 346	5	5	2	2	14
Нижний Новгород	1 263 873	5	5	4	1	15
Казань	1 190 850	3	5	0	1	9
Самара	1 172 348	4	3	1	1	9
Челябинск	1 169 432	3	2	6	1	12
Омск	1 166 092	3	3	2	0	8
Ростов-на-Дону	1 109 835	1	2	1	1	5
Уфа	1 096 702	1	2	8	0	11
Красноярск	1 035 528	9	15	14	4	42
Пермь	1 026 477	3	3	2	0	8
Волгоград	1 017 985	0	0	0	2	2
Воронеж	1 014 610	5	0	5	0	10
Саратов	840 785	1	2	3	0	6
Краснодар	805 680	5	5	3	0	13
Тольятти	718 127	4	0	1	0	5
Тюмень	679 861	5	5	8	0	18
Ижевск	637 309	1	1	0	0	2
Барнаул	632 784	1	0	4	0	5
Иркутск	612 973	4	1	1	2	8
Владивосток	603 244	4	3	2	0	9
Ярославль	602 400	0	0	1	0	1
Хабаровск	601 043	3	0	3	0	6
Калининград	448 548	1	0	1	0	2
Сочи	394 651	3	0	0	3	6
Итого:		90	94	102	41	327

ны следующие архитектурные приемы: применение атриумных пространств, остекленных крыш, этажей с зимними садами, «зеленых» стен, кровель.

3. Примеры велнес-центров в различных типах городской среды. Велнес-центры, расположенные в центре города, как правило, стараются привлечь возможного посетителя широким спектром услуг и нестандартным объемно-планировочным решением. Таков велнес-клуб «Чистые пруды» в Москве. Это здание с асимметричным объемом, в оформлении которого использованы как классические элементы — колонны, портики, фронтон, антаблемент, так и современные — сплошное остекление фасада, новейшие отделочные материалы и инженерные системы (рис. 1). Велнес-центр позиционируется как элитный, закрытый клуб.

Примером размещения в срединной зоне является оздоровительный центр «Wellness-клуб» в Екатеринбурге. Велнес-центр расположен на 11-м этаже многофункционального центра. Это современное здание, имеющее сложную композицию и большое количество остекления (рис. 2). Размещение на высоте дает велнес-центру такое преимущество, как впечатляющий вид на город, который стал возможен посредством применения панорамного остекления. В здании находится отель «Онегин» и несколько десят-

Рис. 1. Общий вид велнес-клуба «Чистые пруды» в Москве

Рис. 2. Общий вид и входная группа многофункционального центра в Екатеринбурге

Рис. 3. Общий вид жилого дома по ул. Сормовская в Краснодаре

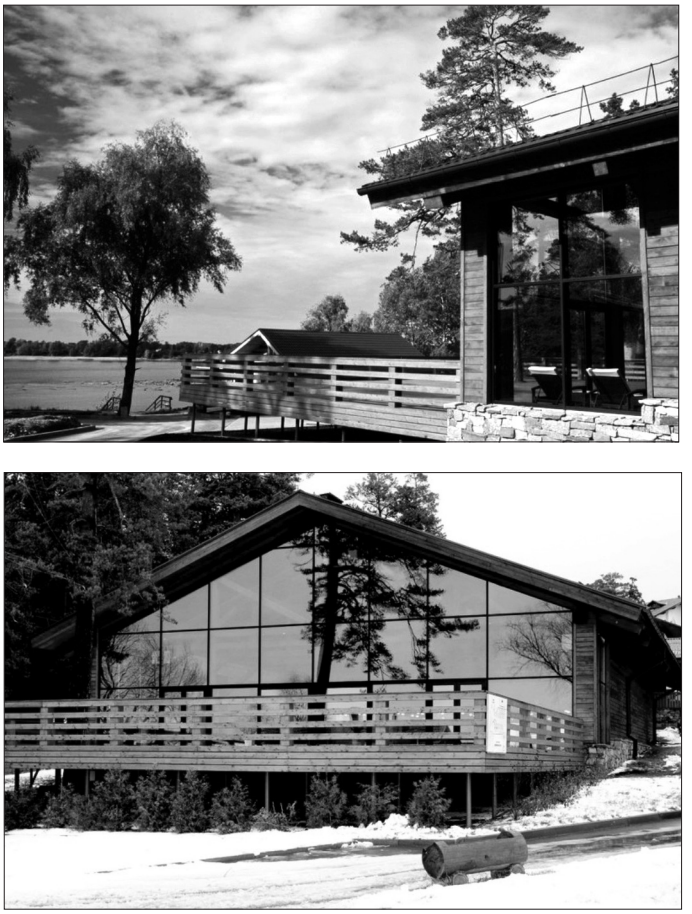


Рис. 4. Общий вид велнес-клуба «Грин Вуд» в Новосибирске

ков фирм, посетители и работники которых являются целевой аудиторией клуба.

Все большую популярность приобретают велнес-центры, расположенные в периферийных зонах. Это «спальные» жилые районы, социокультурная жизнь которых сосредоточивается в многофункциональных развлекательных центрах. Для этих зон характерно встроенно-пристроенное размещение велнес-клубов. Например, велнес-центр «Кристалл» в Краснодаре: жилой дом по ул. Сормовская представляет собой трехчастный объем, фрагментарно облицованный синим стеклом (рис. 3). Подобные здания находятся во многих аналогичных районах в городах по всей России. В данном случае велнес-центр ориентирован на жильцов близлежащих домов. Этот пример иллюстрирует, что диапазон сферы услуг, обслуживающих жилые дома, стал дополняться. Помимо привычных парикмахерских, магазинов и химчисток стали появляться велнес-центры.

Велнес-центры, расположенные в пригородных зонах, — это вариант, изначально предусмотренный в философии здорового образа жизни [5]. Чистый воздух, природное окружение, возможность применения натуральных материалов, низкоэтажные здания, сомасштабные человеческому росту. Эти особенности реализованы в велнес-клубе «Грин Вуд» в пригороде Новоси-

бирска. Деревянные здания с двускатной кровлей, сплошным остеклением, окруженные сосновым лесом, расположены на берегу Обского моря (рис. 4). Выдержана стилистика загородного европейского дома (австрийское шале), но без фахверковых колонн в торцах, их заменяют фермы из клееного бруса внутри. Комплекс расположен в получасе езды от центра города, ориентирован на обеспеченных людей, которым необходимо снять повседневный стресс или же приехать на выходные, чтобы восстановиться и отвлечься от работы.

4. Заключение. Велнес-центр включает в себя диагностическую, оздоровительную, лечебную, спортивную, развлекательную, торговую функции и функцию общественного питания [6]. Велнес-центры, расположенные в городах, — это альтернатива санаторно-курортному лечению для людей, не обладающих достаточным временем и материальными ресурсами для посещения загородных оздоровительных комплексов [7]. Положительные моменты — местоположение в застройке и возможность варьирования времени посещения — от нескольких часов до нескольких недель. Негативный аспект, как правило, отсутствие естественной природной среды вокруг. В велнес-центрах человек может расслабиться, получить заряд положительных эмоций, но для полноценного лечения необходимо обращаться в специализированные организации. Тем не менее общее количество велнес-центров в 27 крупнейших городах России составляет 327 зданий. Тот факт, что большая часть находится в пределах черты города (286 шт.), свидетельствует о востребованности подобных объектов у определенной части населения. Сегодня появляются комплексы, рассчитанные на семейное посещение. Велнес-центр в России — разноплановое учреждение, которое обеспечивает физическую и психологическую поддержку здоровья человека, находящегося в постоянном городском стрессе [8].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шарабчиев Ю.Т. Спа и велнес: что это такое? // Медицинские аспекты спа-индустрии. 2013. № 2. С. 79–83.
2. Социально-культурные функции города и пространственная среда / [Л.С. Бахурина, В.Г. Вардосанидзе, С.Г. Кешишян и др.]; под общ. ред. Л.Б. Когана. М. : Стройиздат, 1982. 177 с. : ил.
3. Магай А.А., Строева Н.Н. Региональные особенности архитектуры велнес-центров // Жилищное строительство. 2015. № 8. С. 39–43.
4. Сикорская В.А. Развитие лечебно-оздоровительного туризма в современных условиях // Вестн. РМАТ. 2014. № 3. С. 34–40.
5. Лобанов Ю.Н. Типология форм отдыха // Вестн. гражд. инженеров. 2012. № 3. С. 42–44.
6. Корякина А.Н. Особенности формирования архитектуры спа-комплексов и велнес-центров в России и за рубежом // Вестн. Том. гос. архитектурно-строит. ун-та. 2008. № 1. С. 14–21.
7. Дуничкин И.В. Развитие экологических поселений. Курортно-оздоровительные и образовательно-рекреационные комплексы // Архитектура и строительство России. 2012. № 2.
8. Кандыбович С.Л., Секач М.Ф. Здоровье населения — залог стабильности и безопасности государства // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 14: психология. 2011. № 4. С. 32–38.

***Строева Наталья Николаевна**, асп.*
Центральный научно-исследовательский и проектный институт жилых и общественных зданий (ЦНИИЭП жилища), г. Москва
***Бацунова Татьяна Павловна**, канд. техн. наук, доц.*
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин).

Получено после доработки 05.08.15

Stroeva Natalya Nikolaevna, post-graduate student, Central Research and Design Institute for Residential and Public Buildings, Moscow, Russia
Batsunova Tatiana Pavlovna, PhD, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

CLASSIFICATION OF WELLNESS CENTERS IN THE URBAN ENVIRONMENT

More than 50 years ago in the United States was introduced the concept of «wellness». It literally translates as «well-being». These were the first centers, the purpose of which was to restore the mental and physical health. They appeared on the stage of rapid development of cities, as a reaction to one of the major negative factors in need of neutralization — stress. Later they got a new definition as a «urban neurosis», which is divided into subtypes such as «manager syndrome», «urban loneliness syndrome» and many others. In recent decades there has been a steady migration to the cities and consolidation of the latter. The trend of increasing pressure of the city on the human has stimulated the development of the wellness industry on the whole. In Russia this phenomenon came about 25 years ago. However the situation both in terms of architecture and in terms of the set of services represented as the most simple copying Western counterparts. This article analyzes the wellness centers in major Russian cities according to their location in the city. In proportion to well-established urban development categories are geographically distributed across the 4 main types of urban environment. Given an examples of architectural design of buildings wellness centers, illustrating the use of various techniques that distinguish each of them.

Keywords: wellness centers, spa complexes, fitness clubs, recreational centers, architecture, urban environment, classification, space.

REFERENCES

1. Sharabchiev Yu.T. Spa i velnes: chto eto takoe? [SPA and Wellness — what is it?]. Meditsinskie aspekty spa-industrii [Medical aspects of the spa industry]. 2013, No. 2, pp. 79–83 (rus.)
2. Sotsial′no-kul′turnye funktsii goroda i prostranstvennaya sreda [Socio-cultural features of the city and spatial environment]. M., Stroyizdat, 1982, 177 p. : Ill.
3. Magay A.A., Stroeva N.N. Regional′nye osobennosti architektury velnes-tsentrov [The regional architectural features of wellness centers]. Zhilishchnoe stroitel′stvo [Housing construction]. 2015, No. 8, pp. 39–43 (rus.)
4. Sikorskaya V.A. Razvitie lechebno-ozdorovitel′nogo turizma v sovremennykh usloviyakh [The development of health tourism in modern conditions]. Vestnik RMAT [Herald RIAT]. 2014, No. 3, pp. 34–40 (rus.)
5. Lobanov Yu.N. Tipologiya form otdykha [Typology of forms of recreation]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]. 2012, No. 3, pp. 42–44 (rus.)

6. Koryakina A.N. Osobennosti formirovaniya arkhitektury spa-compleksov i velnes-tsentrov v Rossii i za rubeshom [Major architectural features of spa and wellness centers in Russia and abroad]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo architekturno-stroitel′nogo universiteta [Bulletin of Tomsk State Architectural University]. 2008, No. 1, pp. 14–21 (rus.)
7. Dunichkin I.V. Razvitie ecologicheskikh poseleniy. Kurortno-ozdorovitel′nye i obrazovatel′no-rekreatsionnye compleksy [The development of ecological communities. Resort and recreational, educational and recreational complexes]. Arkhitektura i stroitel′stvo Rossii [Architecture and construction of Russia]. 2012, No. 2 (rus.)
8. Kandybovich S.L., Sekach M.F. Zdorov′e naseleniya — zalog stabil′nosti i bezopasnosti gosudarstva [Public health – the key to the stability and security of the state]. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 14: psikhologiya [Bulletin of Moscow University. Series 14: psychology]. 2011, No. 4, pp. 32–38 (rus.)

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 699.86

А.И. ГНЫРЯ, С.В. КОРОБКОВ, Д.И. МОКШИН, А.А. КОШИН, К.С. ГАУСС, В.И. ТЕРЕХОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА МОДЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ЗДАНИЙ*

Часть 2. ДВЕ ПРИЗМЫ, НАХОДЯЩИЕСЯ В СЛЕДЕ[1]

Приведены результаты цикла экспериментальных исследований локального и среднего коэффициентов теплообмена моделей в виде квадратных призм, которые моделируют группу зданий. В статье представлены графики изменения локального и среднего коэффициентов системы призм в зависимости от изменения расстояния между ними ($L1/a$) по направлению течения воздушного потока.

Ключевые слова: средний коэффициент теплообмена, число Рейнольдса, угол атаки воздушного потока, внешний теплообмен, физическое моделирование.

Данные исследования являются составной частью комплексных экспериментальных исследований аэромеханики и теплообмена моделей системы зданий при вариации их формы и расположения [1–4]. В экспериментально-теоретических работах данного направления [5–14] решен ряд частных задач, который не может описать весь спектр возможных воздействий отрывных потоков, формируемых различными гранями. Подобные исследования проводятся для разработки технически обоснованных норм на тепловые потери через ограждающие конструкции зданий и сооружений.

Методика проведения экспериментов и обработки результатов измерений представлена в работах [15, 16].

Все эксперименты по исследованию среднего коэффициента теплоотдачи проводились на аэродинамической трубе разомкнутого типа, работающей на всасывание. Методика обработки и проведения экспериментов изложена в работе [3].

В данном исследовании определяющим параметром является калибр моделей $L1/a$, выраженный отношением расстояния между моделями в свете ($L1$) к поперечному размеру квадратной призмы (a = 50 мм).

* Исследования выполнены при финансовой поддержке работ по гранту РФФИ (проект № 13-08-00505а).

[1] См.: Гныря А.И., Коробков С.В., Мокшин Д.И., Кошин А.А., Гаусс К.С., Аношкина О.О., Терехов В.И. Исследование теплообмена моделей системы зданий. Ч. 1: Отдельно стоящие призмы различной высоты // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 8. С. 97–105.

© Гныря А.И., Коробков С.В., Мокшин Д.И., Кошин А.А., Гаусс К.С., Терехов В.И., 2015

Для изучения влияния изменения теплообмена от местоположения призмы в тандеме в рабочую камеру аэродинамической трубы устанавливались две модели. Теплообмен измерялся только у модели 2, модель 1 не нагревалась. Все эксперименты проводились при одном числе Рейнольдса, $\mathrm{Re} = 4{,}25 \cdot 10^4$ и углах атаки воздушного потока 0 и 45°. Между моделями расстояние ($L1/a$) изменялось в продольном направлении от 0,5 до 6,0 с интервалом 0,5, далее от 6,0 до 30,0 с интервалом 3,0 (рис. 1).

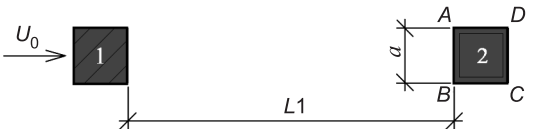


Рис. 1. Схема расположения моделей в следе друг за другом при изменении расстояний между ними $L1/a$

Отметим, что наиболее выраженные изменения теплообмена наблюдаются на боковых гранях (B–C) и (D–A) при угле атаки воздушного потока $\varphi = 0°$ (рис. 2). Из рис. 2 видно, что на боковых гранях (B–C) и (D–A) модели 2 при увеличении расстояния между моделями вначале происходит интенсификация локального теплообмена. Это обусловлено постепенным размытием вихревой застойной зоны между призмами. Рост теплообмена имеет место вплоть до $L1/a = 6$, когда влияние высокотурбулентных отрывных потоков от первой призмы максимально. Далее влияние модели 1 на теплоотдачу задней модели ослабевает, и при удалениях $L1/a \geq 27$ модель в следе можно считать как отдельно стоящую.

Подобные закономерности наблюдаются и для среднего по граням теплообмена. Такие данные при вариации расстояния между призмами $L1/a$ и углах атаки воздушного потока $\varphi = 0$ и 45° показаны на рис. 3 и 4. Для сравнения на этих рисунках представлены данные для $L1/a \to \infty$, что соответствовало случаю обтекания отдельно стоящей призмы на плоскости [17].

Из рис. 3 следует, что максимальный теплообмен на всех стенках призмы достигается при расстояниях между моделями $L1/a = 4{,}0$–$6{,}0$. При

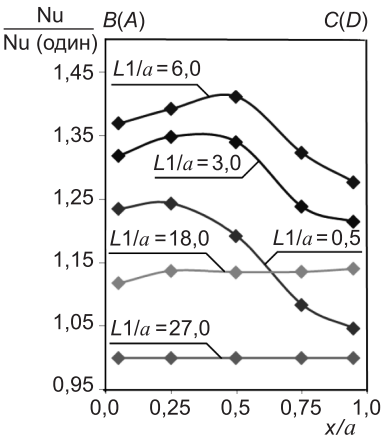


Рис. 2. Теплообмен по грани (B–C) модели 2 в зависимости от расстояния между моделями $L1/a$, $\varphi = 0°$, $\mathrm{Re} = 4{,}25 \cdot 10^4$

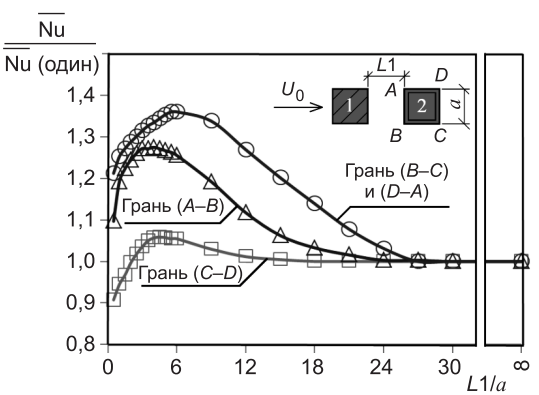


Рис. 3. Теплообмен граней модели 2 в зависимости от расстояния между моделями $L1/a$, $\varphi = 0°$, $U_0 = 14$ м/с

сближении моделей ($L1/a \to 0$), вследствие образования застойной вихревой ячейки между призмами, конвективный теплоперенос подавляется. При этом наибольшая интенсификация теплообмена имеет место на боковых гранях (*B–C*) и (*D–A*), минимальная — на кормовой (*C–D*). На передней грани (*A–B*) наблюдается промежуточное значение и по сравнению с отдельно стоящей моделью влияние вихревого следа от передней призмы сказывается меньше.

По мере удаления призм друг от друга ($L1/a$ > 6,0–21,0) средний теплообмен по граням модели 2 постепенно снижается, особенно на боковых гранях (*B–C*) и (*A–D*), что в итоге уменьшает вклад этих граней в суммарный теплообмен от всей поверхности.

Подобные тенденции наблюдаются и при угле атаки воздушного потока φ = 45° (см. рис. 4). Однако экстремальное поведение теплоотдачи на передней грани (*A–B*) выражено в меньшей мере, чем при угле атаки φ = 0°, а в кормовой зоне средний коэффициент теплоотдачи плавно снижается по мере увеличения расстояния между моделями и асимптотически переходит к значению для отдельно стоящей призмы ($L1/a \to \infty$).

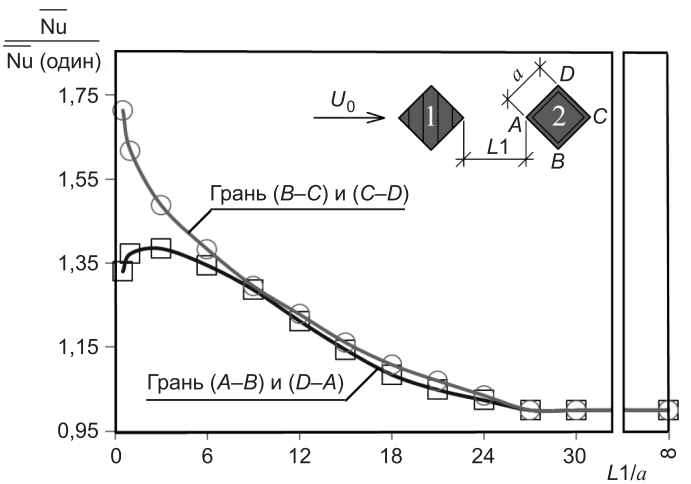


Рис. 4. Теплообмен граней модели 2 в зависимости от расстояния между моделями $L1/a$, φ = 45°, U_0 = 14 м/с

Для прогнозирования тепловых потерь наибольший практический интерес представляют данные по средней теплоотдаче от всей поверхности призмы. Такие опытные результаты представлены на рис. 5. Отметим наиболее важные особенности поведения интегрального теплообмена в зависимости от расстояния между моделями $L1/a$ и угла атаки φ.

Из рис. 5 видно, что при изменении расстояния между моделями $L1/a$ угол атаки воздушного потока φ оказывает сильное влияние на величину интегрального теплообмена от всей поверхности модели 2 и в целом повторяет поведение теплообмена на отдельных гранях (см. рис. 3, 4).

При максимальном сближении ($L1/a$ < 0,5) различие между данными по среднему теплообмену $(\overline{\overline{\mathrm{Nu}}})$ и для φ = 0° и φ = 45° невелико и не превышает 10 %. С увеличением расстояния данные начинают качественно изменяться. Так, для φ = 0° интенсивность теплообмена вначале возрастает, достигает

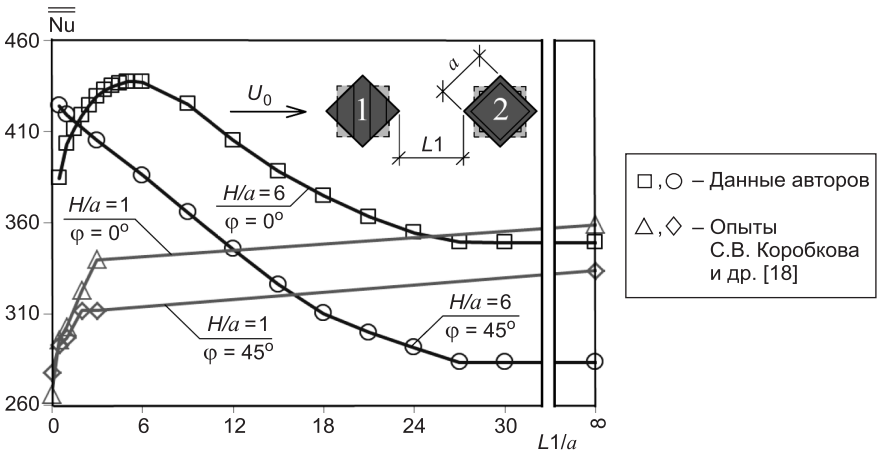


Рис. 5. Теплообмен по всей поверхности модели 2 в зависимости от расстояния между моделями $L1/a$, U_0 = 14 м/с

максимума при $L1/a$ ~ 5–6, а затем плавно снижается до величины отдельно стоящей призмы. При φ = 45° теплообмен монотонно снижается с увеличением дистанции между моделями. Только на малых расстояниях $L1/a$ =0,5–3,0 теплообмен при φ = 45° выше, чем при φ = 0°.

На рис. 5 для сопоставления представлены результаты экспериментов С.В. Коробкова и др. [18] по интегральной теплоотдаче тандема кубов. Видно, что эти данные качественно ведут себя иным образом — вначале, по мере удаления, теплоотдача резко возрастает, а затем при $L1/a$ > 4 этот рост замедляется. Отсутствие подробных данных в этой области не позволяет провести более детального сравнения и анализа результатов измерений, полученных для призмы и куба.

Результаты исследований. 1. Экспериментально изучена теплоотдача от прямоугольной призмы при наличии у нее впередистоящей призмы, расположенной на различных расстояниях. При увеличении калибра между призмами ($L1/a$) картина обтекания воздушным потоком модели 2 приближается к модели 1, что обусловлено ее постепенным выходом из аэродинамической «тени». При этом отчетливо обнаруживаются те же режимы течения, что и при обтекании потоком воздуха одиночно стоящей призмы.

2. Механизм уменьшения теплообмена при увеличении расстояния между призмами $L1/a$, как свидетельствуют об этом результаты визуализационных наблюдений [19], объясняется снижением воздействия отрывных течений на модель, находящуюся в следе, и уменьшением степени влияния вихреобразования между моделями.

3. В ходе экспериментов было обнаружено наличие сильной интенсификации локальных и средних коэффициентов теплоотдачи при изменении расстояния $L1/a$ между моделями.

4. При изменении расстояния между моделями $L1/a$ угол атаки воздушного потока φ оказывает сильное влияние на величину интегрального теплообмена от всей поверхности модели, находящейся в следе.

5. Полученные данные по локальной и средней теплоотдаче для призм при вариации расстояния между ними ($L1/a$) позволяют оценить величины тепловых потерь, а также тепловое состояние зданий и сооружений призматической формы с соотношением сторон H/a = 6,0.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гныря А.И., Терехов В.И., Коробков С.В. Результаты визуализации течения воздушного потока вдоль ряда из двух кубов, расположенных на плоскости друг за другом // Вестн. ТГАСУ. 2009. № 3. С. 117–124.
2. Гныря А.И., Коробков С.В., Мокшин Д.И., Кошин А.А., Терехов В.И. Влияние числа Рейнольдса и угла атаки воздушного потока на распределение локального и среднего коэффициентов теплоотдачи моделей зданий // Вестн. ТГАСУ. 2013. №3. С. 320–328.
3. Гныря А.И., Коробков С.В., Кошин А.А., Мокшин Д.И. Комплексные экспериментальные исследования аэродинамики и теплообмена моделей зданий и сооружений // Вестн. ТГАСУ. 2011. № 4. С. 113–126.
4. Гныря А.И., Коробков С.В., Бояринцев А.П., Мокшин Д.И. Исследование теплообмена тандема моделей зданий при линейном их расположении // Вестн. ТГАСУ. 2014. № 5. С. 90–97.
5. Meinders E.R., Van Der Meer T.H., Hanjalic K. Local convective heat transfer from an array of wall-mounted cubes // Int. J. Heat Mass Transfer. 1997. P. 335–346.
6. Meinders E.R., Hanjalic K. Vortex structure and heat transfer in turbulent flow over a wall-mounted matrix of cubes // Int. J. Heat Mass Transfer. 1999. P. 255–267.
7. Meinders E.R., Hanjalic K. Experimental study of the convective heat transfer from in-line and staggered configurations of two wall-mounted cubes // Int. J. Heat Mass Transfer. 2002. P. 465–482.
8. Goldstein R.J., Yoo S.Y., Chung M.K. Convective mass transfer from a square cylinder and its base plate // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1990. Vol. 33. No. 11. P. 9–18.
9. Igarashi T. Local heat transfer from a square prism to an air stream // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1986. Vol. 29. No. 5. P. 777–784.
10. Reiher H. Der warmeubergang von stromender luft an rohrbundel in kreuzstrom // VDI Forshungsheft. 1925. No. 269. S. 47.
11. Robertson J.M., Wedding J.B., Peterka J.A., Cermak J.E. Wall pressures of separation-reattachment flow on a square in aniform flow // J. Ind. Aerodyn. 1977/1978. No. 2. P. 345–359.
12. Sakata H., Adashi T., Inamuro T. A numerical analysis of unsteady separated flow by discrete vortex model (1st Report, Flow around a square prism) // Trans. Soc. Mech. Engrs. 1983. P. 49–440, 801–808.
13. Dong-Hyeog Yoon, Yang Kyung-Soo, Choi Choon-Bum. Heat transfer enhancement in channel flow using an inclined square cylinder // J. of Heat Transfer. 2009. Vol. 131. P. 1–4.
14. Dutta S., Muralidhar K., Panigrahi P.K. Influence of the orientation of a square cylinder on the wake properties // Experiments in Fluids. 2003. Vol. 34. P. 16–23.
15. Мокшин Д.И., Коробков С.В. Методика проведения и обработки экспериментов по исследованию локальной и средней теплоотдачи зданий и сооружений // Наука и современность. 2014. № 31. С. 112–122.
16. Мокшин Д.И., Коробков С.В. Расчет локального коэффициента конвективной теплоотдачи с помощью программы ЭВМ // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. 2014. № 13. С. 216–223.
17. Мокшин Д.И., Коробков С.В. Исследование среднего теплообмена отдельно стоящих квадратных призм // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. 2014. № 13. С. 196–202.
18. Гныря А.И., Терехов В.И., Коробков С.В. Моделирование теплопотерь от монолитных конструкций кубической формы // Вестн. РААСН. Владивосток: Дальнаука, 2006. Вып. 10. С. 100–107.

19. Мокшин Д.И., Коробков С.В. Исследование структуры течения воздушного потока ряда квадратных призм при линейном их расположении // Новый взгляд: междунар. науч. вестн. 2014. № 5. С. 121–130.

***Гныря Алексей Игнатьевич**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: sp_tgasu@mail.ru*
Томский государственный архитектурно-строительный университет
***Коробков Сергей Викторович**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: korobkov@hotmail.ru*
Томский государственный архитектурно-строительный университет
***Мокшин Дмитрий Ильич**, ассист.; E-mail: mokshin@sibmail.com*
Томский государственный архитектурно-строительный университет
***Кошин Антон Александрович**, ст. препод.; E-mail: dawghood@mail.ru*
Томский государственный архитектурно-строительный университет
***Гаусс Ксения Сергеевна**, ассист.; E-mail: gauss.ksyu@mail.ru*
Томский государственный архитектурно-строительный университет
***Терехов Виктор Иванович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: terekhov@itp.nsc.ru*
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск

Получено 14.08.15

Gnyrya Aleksey Ignatievich, DSc, professor; E-mail: sp_tgasu@mail.ru; Tomsk State University of Architecture and Building, Russia
Korobkov Sergey Viktorovich, PhD, assistant professor; E-mail: korobkov@hotmail.ru; Tomsk State University of Architecture and Building, Russia
Mokshin Dmitriy Iljich, assistant; E-mail: mokshin@sibmail.com; Tomsk State University of Architecture and Building, Russia
Koshin Anton Alexandrovich, senior lecturer; E-mail: dawghood@mail.ru; Tomsk State University of Architecture and Building, Russia
Gauss Kseniya Sergeevna, assistant; E-mail: gauss.ksyu@mail.ru; Tomsk State University of Architecture and Building, Russia
Terekhov Viktor Ivanovich, DSc, professor; E-mail: terekhov@itp.nsc.ru; Kutateladze Institute of Thermal Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

HEAT TRANSFER MODEL OF THE SYSTEM OF THE BUILDING
Part 2. THE TWO PRISMS, LOCATED IN THE FOLLOWING

The results of experimental studies of the local loop and the average coefficient of heat transfer models in the form of a square prism that simulate a group of buildings. The article presents graphs of the local and average coefficient of prisms depending on changes in the distance between them ($L1/a$) in the flow direction of the air flow.

Keywords: average coefficient of heat transfer, Reynolds number, angle of attack of the air stream, external heat transfer, physical modeling.

REFERENCES

1. Gnyrya A.I., Terekhov V.I., Korobkov S.V. Rezul’taty vizualizatsii techeniya vozdushnogo potoka vdol’ ryada iz dvukh kubov, raspolozhennykh na ploskosti drug za drugom [The results of flow visualization of airflow along the row of two cubes located on the plane each other]. Vestnik TGASU [Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building], 2009, No. 3, pp. 117–124 (rus.)

2. Gnyrya A.I., Korobkov S.V., Mokshin D.I., Koshin A.A., Terekhov V.I. Vliyanie chisla Reynol'dsa i ugla ataki vozdushnogo potoka na raspredelenie lokal'nogo i srednego koeffitsientov teplootdachi modeley zdaniy [Distribution of local and average heat transfer coefficients depending on Reynolds criterion and angle of attack]. Vestnik TGASU [Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building], 2013, No. 3, pp. 320–328 (rus.)
3. Gnyrya A.I., Korobkov S.V., Koshin A.A., Mokshin D.I. Kompleksnye eksperimental'nye issledovaniya aerodinamiki i teploobmena modeley zdaniy i sooruzheniy [Complex experimental studies of aerodynamics and heat transfer models of buildings and structures]. Vestnik TGASU [Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building], 2011, No. 4, pp. 113–126 (rus.)
4. Gnyrya A.I., Korobkov S.V., Boyarintsev A.P., Mokshin D.I. Issledovanie teploobmena tandema modeley zdaniy pri lineynom ikh raspolozhenii [Heat transfer in building models at tandem linear arrangement]. Vestnik TGASU [Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building], 2014, No. 5, pp. 90–97 (rus.)
5. Meinders E.R., Van Der Meer T.H., Hanjalic K. Local convective heat transfer from an array of wall-mounted cubes. Int. J. Heat Mass Transfer, 1997, pp. 335–346.
6. Meinders E.R., Hanjalic K. Vortex structure and heat transfer in turbulent flow over a wall-mounted matrix of cubes. Int. J. Heat Mass Transfer, 1999, pp. 255–267.
7. Meinders E.R., Hanjalic K. Experimental study of the convective heat transfer from in-line and staggered configurations of two wall-mounted cubes. Int. J. Heat Mass Transfer, 2002, pp. 465–482.
8. Goldstein R.J., Yoo S.Y., Chung M.K. Convective mass transfer from a square cylinder and its base plate. Int. J. Heat and Mass Transfer, 1990, Vol. 33, No. 11, pp. 9–18.
9. Igarashi T. Local heat transfer from a square prism to an air stream. Int. J. Heat and Mass Transfer, 1986, Vol. 29, No. 5, pp. 777–784.
10. Reiher H. Der warmeubergang von stromender luft an rohrbundel in kreuzstrom. VDI Forshungsheft, 1925, No. 269. S. 47.
11. Robertson J.M., Wedding J.B., Peterka J.A., Cermak J.E. Wall pressures of separation-reattachment flow on a square in aniform flow. J. Ind. Aerodyn., 1977/1978, No. 2, pp. 345–359.
12. Sakata H., Adashi T., Inamuro T. A numerical analysis of unsteady separated flow by discrete vortex model (1st Report, Flow around a square prism). Trans. Soc. Mech. Engrs., 1983, pp. 49–440, 801–808.
13. Dong-Hyeog Yoon, Yang Kyung-Soo, Choi Choon-Bum. Heat transfer enhancement in channel flow using an inclined square cylinder. J. of Heat Transfer, 2009, Vol. 131, pp. 1–4.
14. Dutta S., Muralidhar K., Panigrahi P.K. Influence of the orientation of a square cylinder on the wake properties. Experiments in Fluids, 2003, Vol. 34, pp. 16–23.
15. Mokshin D.I., Korobkov S.V. Metodika provedeniya i obrabotki eksperimentov po issledovaniyu lokal'noy i sredney teplootdachi zdaniy i sooruzheniy [Method of and processing of experiments to investigate the local and average heat transfer of buildings]. Nauka i sovremennost' [Science and modernity], 2014, No. 31, pp. 112–122 (rus.)
16. Mokshin D.I., Korobkov S.V. Raschet lokal'nogo koeffitsienta konvektivnoy teplootdachi s pomoshch'yu programmy EVM [The calculation of the local convective heat transfer coefficient with the help of computer programs]. Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: problemy i resul'taty [Basic and applied research: challenges and results], 2014, No. 13, pp. 216–223 (rus.)
17. Mokshin D.I., Korobkov S.V. Issledovanie srednego teploobmena otdel'no stoyashchikh kvadratnykh prizm [Investigation of heat transfer medium detached square

prisms]. Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: problemy i resul'taty [Basic and applied research: challenges and results], 2014, No. 13, pp. 196–202 (rus.)

18. Gnyrya A.I., Terekhov V.I., Korobkov S.V. Modelirovanie teplopoter′ ot monolitnykh konstruktsiy kubicheskoy formy [Modeling of heat loss from the monolithic structures of the cubic form]. Vestnik RAASN [Vestnik of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences]. Vladivostok, Dal'nauka, 2006, Vol. 10, pp. 100–107 (rus.)
19. Mokshin D.I., Korobkov S.V. Issledovanie structury techeniya vozdushnogo potoka ryada kvadratnykh prizm pri lineynom ikh raspolozhenii [The study of the flow structure of the air flow in the number of square prisms of their linear arrangement]. Novyy vzglyad: mezhdunarodnyy nauchnyy vestnik [A new look. International Scientific Gazette], 2014, No. 5, pp. 121–130 (rus.)

УДК 539.3

В.Д. КУРГУЗОВ, А.Г. ДЕМЕШКИН

ЗАРОЖДЕНИЕ ТРЕЩИН НА ПОВЕРХНОСТИ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ В ВИДЕ КРУГОВЫХ ОТВЕРСТИЙ ПРИ СЖАТИИ ОБРАЗЦОВ ИЗ КВАЗИХРУПКОГО МАТЕРИАЛА*

Эксперименты на одноосное нагружение стандартных образцов из оргстекла обнаружили у этого материала свойство разносопротивляемости растяжению и сжатию. Построены диаграммы деформирования при растяжении и сжатии. Предложены две математические модели деформирования оргстекла — линейно-упругая и упругопластическая. Представлены результаты экспериментов на сжатие до разрушения квадратных пластин из оргстекла, содержащих круговые отверстия. Проведено компьютерное моделирование процесса распространения трещин с поверхности концентраторов напряжений в геометрически нелинейной постановке. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов показало, что обе математические модели (линейно-упругая и упругопластическая) адекватно описывают зарождение и развитие трещин нормального отрыва с поверхности концентраторов напряжений.

Ключевые слова: оргстекло, концентратор напряжений, разрушение, компьютерное моделирование.

Введение. В экспериментальной механике разрушения широко используются методы, основанные на наблюдении первых признаков разрушения в области концентрации напряжений и последующего использования известного решения упругой задачи. Применение таких методов возможно только в том случае, если известны локальные механические свойства испытываемого материала. Их знание также необходимо при проектировании сооружений, поскольку зоны концентрации напряжений являются очагами зарождения трещин, развитие которых приводит в конечном итоге к потере несущей способности и разрушению конструкций.

В лабораторных условиях при исследовании хрупкого разрушения материала в зоне концентрации напряжений чаще всего испытывают образцы, содержащие вырезы с гладким контуром в виде эллиптических, в частности круглых, отверстий. Во время испытания следят за образованием трещины на контуре выреза и в момент ее появления фиксируют значение приложенной нагрузки. До момента появления трещины деформирование образца считается линейно-упругим. В работах [1–3] исследовались процессы трещинообразования в образцах горных пород при сжатии. В статье [1] приведены результаты экспериментального определения критического давления в момент образования сдвиговых трещин на образцах из гипса, содержащих искусственные дефекты в виде цилиндрических отверстий.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-08-00113).

© Кургузов В.Д., Демешкин А.Г., 2015

Авторы работы [2] испытывали на одноосное сжатие доломитовый известняк и поташ. Результаты аналогичных экспериментов на образцах из гранита приведены в работе [3]. Экспериментальные данные демонстрируют существенный масштабный эффект, т.е. влияние диаметра отверстия на локальную прочность материала. С уменьшением диаметра отверстия критическое давление увеличивается, достигая предела прочности на сжатие. С увеличением диаметра отверстия критическое давление асимптотически приближается к пределу прочности на растяжение. В работе [4] предложен модифицированный метод «бразильской пробы», другое название — метод раскалывания керна по образующей путем введения концентратора напряжений в виде осевого отверстия. Испытания таких образцов дают меньшую дисперсию величин прочности и практически однозначно гарантируют старт трещины с внутреннего отверстия, тем самым уменьшая количество отбракованных образцов, как не соответствующих стандарту.

Ниже представлены результаты экспериментально-теоретических исследований распространения трещин при сжатии образцов из оргстекла, содержащих концентраторы напряжений в виде круглых отверстий.

1. Описание экспериментов. Для исследования разрушения по механизму «сжатие + сдвиг» были изготовлены образцы из оргстекла, содержащие круглые отверстия. Выбор прозрачного материала для эксперимента объясняется тем, что в таких материалах, как оргстекло, легко визуально зафиксировать появление трещин на границе концентратора напряжений. В квадратной пластине 40×40 мм, толщиной 10 мм, высверливались 2–3 отверстия диаметром 10 мм, расположенные по диагонали на равном расстоянии друг от друга. Образцы подвергались сжатию в режиме жесткого нагружения со скоростью 0,5 мм/мин на испытательной машине Zwick/Roel до появления трещин. В процессе испытания наблюдалось зарождение симметричных трещин, которые росли при дальнейшем увеличении нагрузки.

На рис. 1 представлена фотография образцов после испытания, стрелками показана приложенная нагрузка. Трещины нормального отрыва возникают с поверхности отверстий в окрестности верхнего и нижнего концов вертикального диаметра, поскольку в этих местах образуются зоны максимальных растягивающих напряжений. Трещины появляются не одновременно: одна или сразу две трещины в угловых отверстиях, затем 1–2 трещины в остальных отверстиях, какой-либо закономерности

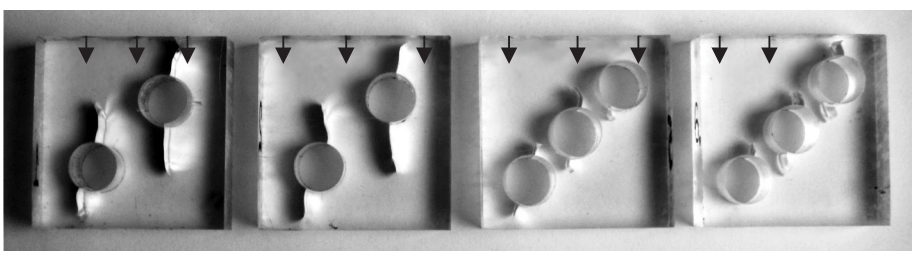


Рис. 1. Результаты экспериментов на сжатие квадратных пластин с отверстиями

в порядке возникновения трещин не обнаружено. В одном из образцов (первый слева на рис. 1, правое верхнее отверстие) зафиксировано появление трещины сдвига в окрестности правого конца горизонтального диаметра, что объясняется возникновением зон сжимающих напряжений в этих точках.

Механические свойства испытываемого материала были определены в серии отдельных экспериментов на одноосное растяжение-сжатие однородных образцов, изготовленных из той же партии оргстекла, что и пластины с отверстиями. В экспериментах на растяжение испытывались плоские образцы в виде лопаток, а также галтели с квадратным поперечным сечением рабочей части. Для проведения экспериментов на сжатие были изготовлены цилиндрические и призматические образцы. Трение между торцами образца и плитами испытательной машины устранялось вкладками из фторопласта толщиной 0,1 мм. Необходимость уменьшения трения путем шлифовки торцов образца или их смазки вызвана стремлением максимально приблизить одноосное сжатие к условиям одноосного деформирования. На рис. 2 показаны диаграммы σ–ε для оргстекла при растяжении и сжатии, точки — данные экспериментов, сплошные кривые — аппроксимация кубическими полиномами, полученная методом наименьших квадратов.

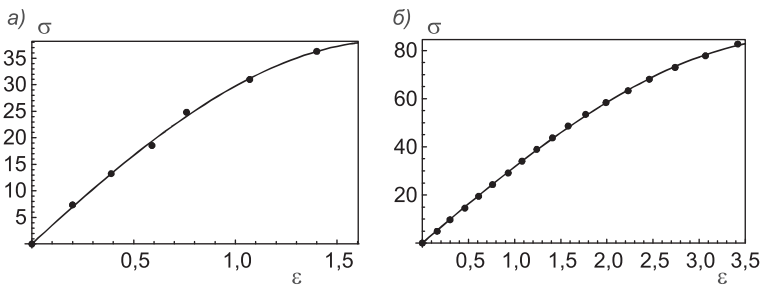


Рис. 2. Диаграммы деформирования оргстекла при растяжении (*а*) и сжатии (*б*)

Данные экспериментов обнаруживают разные механизмы деформирования оргстекла при растяжении и сжатии. При растяжении образцы разрушались хрупко, без образования шейки либо утяжек в месте разрыва, т.е. без заметных пластических деформаций. При сжатии цилиндрических образцов с трением на торцах образцы принимали бочкообразную форму, которая сохранялась после снятия нагрузки. При сжатии без трения образцы имели цилиндрическую форму, но при разгрузке укорочение и утолщение образцов по сравнению с исходными размерами свидетельствовало о наличии остаточных деформаций. Таким образом, оргстекло при растяжении является нелинейно-упругим материалом, а при сжатии — упругопластическим. По результатам обработки всех экспериментов были установлены следующие механические характеристики: модуль Юнга $E = 3178 \div 3315$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}35 \div 0{,}39$, предел прочности на растяжение $\sigma_t = 48 \div 56$ МПа, предел прочности на сжатие $\sigma_c = 85 \div 100$ МПа, предел текучести $\sigma_Y \approx 40$ МПа.

2. Компьютерное моделирование. Рассмотрим 2D-модель квадратной пластины 40×40 мм с отверстиями диаметром 10 мм в условиях плоского напряженного состояния. Пластина зажата между двумя жесткими плитами, причем нижняя плита неподвижна, а верхняя сжимает пластину с постоянной скоростью V_0 так, что за единичное время верхняя плита перемещается на расстояние V_0, мм, т.е. деформирование пластины происходит в режиме жесткого нагружения. На границе «пластина–плита» ставятся условия склейки (контакт без проскальзывания или жесткий контакт) деформируемого тела (пластина) и жесткого тела (плита), т.е. решается контактная задача механики деформируемого твердого тела. В лабораторных экспериментах грани пластин не шлифовались, при сжатии за счет сильного трения верхняя и нижняя грани оказывались жестко заделаны, поэтому постановка граничных условий в виде жесткого контакта в данном случае оправдана. Таким образом, в расчетах задавались следующие граничные условия: на верхней грани $u = 0$, $v = -V_0t$, на нижней грани $u = 0$, $v = 0$, где u, v — горизонтальные и вертикальные смещения соответственно, t — некоторый монотонно возрастающий параметр нагружения.

Как отмечалось выше, оргстекло по-разному сопротивляется растяжению и сжатию. Поэтому в расчетах использовались две разные модели материала: линейно-упругий материал и упругопластический с кусочно-линейным упрочнением, в обоих случаях задача решалась в геометрически нелинейной постановке с использованием общих уравнений механики деформируемого твердого тела [5]. Для линейно-упругого материала, подчиняющегося закону Гука, задавались следующие характеристики: E = 3000 МПа, ν = 0,35. Нелинейная диаграмма деформирования (см. рис. 2, *а*) аппроксимировалась линейной с осредненным модулем упругости. Для упругопластического материала задавались следующие характеристики: T = 3200 МПа, ν = 0,39, σ_Y = 40. Реальная диаграмма σ–ε (см. рис. 2, *б*) аппроксимировалась кусочно-линейной, в численном алгоритме предел текучести σ_Y задавался таблично, как функция эквивалентной пластической деформации.

Расчет напряженно-деформированного состояния пластины выполнялся в пакете конечно-элементного анализа MSC.Marc 2014 [6]. Пластина покрывалась сеткой 4-узловых 4-угольных элементов с линейной аппроксимацией перемещений. Число элементов 35 836 в пластине с двумя отверстиями и 33 446 в пластине с тремя отверстиями. Для контроля внутренней сходимости были проведены дополнительные расчеты тех же задач на сетках, содержащих 143 076 элементов в пластине с двумя отверстиями и 133 757 в пластине с тремя отверстиями.

3. Моделирование распространения трещин с поверхности концентратора. Процесс распространения трещины в линейно-упругом изотропном теле можно характеризовать интенсивностью освобождения упругой энергии G, которая в методе конечных элементов вычисляется с помощью методики виртуального закрытия трещины VCCT [7]. Данный метод опирается на следующие гипотезы: 1) энергия, требуемая для разделения поверхностей, равна энергии, необходимой для смыкания этих

же поверхностей; 2) напряженное состояние вокруг вершины трещины существенно не изменится, когда трещина подрастет на малую величину.

Концепция квазихрупкого разрушения Гриффитса основана на энергетическом балансе энергии деформации тела и работе, затрачиваемой на образование новой поверхности. Энергетический критерий Гриффитса можно записать в виде

$$G = -\frac{dW}{dl} \le G_c ,$$

где W — энергия деформации, l — длина трещины. G зависит от геометрии тела и от приложенных нагрузок, параметр G_c называется вязкостью разрушения и является характеристикой материала, определяемой из экспериментов. Интенсивность освобождения упругой энергии G не является производной по времени, а характеризует скорость изменения потенциальной энергии тела с изменением длины трещины. Соотношение представляет собой критерий разрушения: трещина начинает расти, когда G достигает критического значения G_c.

Вязкость разрушения G_c никак не связана с прочностью материала на растяжение σ_t, а выражается через критическое значение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) K_{Ic} по известной в механике разрушения формуле $G_c = K_{Ic}^2 / E$ (для плоского напряженного состояния). Критический КИН, определяемый по данным стандартных испытаний, для оргстекла примерно равен $K_{Ic} \approx 1$ МПа · м$^{1/2}$. Отсюда находим значение вязкости разрушения $G_c = 0{,}3$ Н/мм.

4. Результаты. На рис. 3 представлены деформированные конфигурации пластин с двумя и тремя отверстиями, полученные по линейно-упругой модели. Как и в эксперименте, наблюдается развитие 4–6 трещин с поверхности концентратора напряжений. Смещение верхней плиты V_0 = 1,3 мм подбиралось таким образом, чтобы полученная критическая нагрузка совпала с экспериментальной. При такой нагрузке происходят сильные искажения формы первоначально круглых отверстий. В используемом

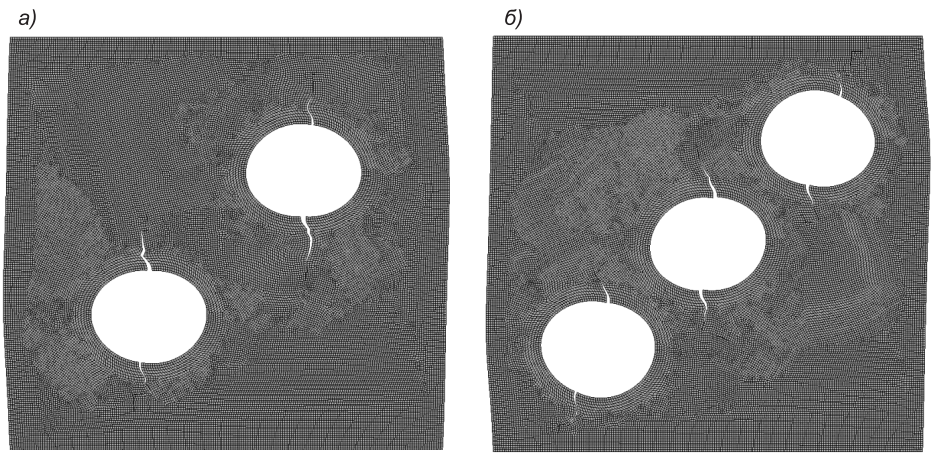


Рис. 3. Распространение трещин с поверхности концентраторов в линейно-упругой модели пластины с двумя (*а*) и с тремя (*б*) отверстиями

варианте метода виртуального закрытия трещины (VCCT) распространение трещин происходит с расщеплением по граням элементов, поэтому конфигурация сетки конечных элементов оказывает влияние на картину трещинообразования. Контрольные расчеты на мелкой сетке показали, что критическая нагрузка, деформированная конфигурация, места зарождения и направление распространения трещин меняются незначительно, но только путь трещины становится менее изломанным. Для более адекватного описания процесса распространения трещин необходимо использование алгоритмов с перестройкой сетки в окрестности ее вершины, однако такие методы требуют значительного увеличения вычислительных мощностей компьютера.

На рис. 4 представлены деформированные конфигурации пластин с двумя и тремя отверстиями, полученные по упругопластической модели, изолиниями показано распределение эквивалентных пластических деформаций

$$\varepsilon^p = \sqrt{\frac{2}{3}\varepsilon_{ij}^p \varepsilon_{ij}^p} \ ,$$

где ε_{ij}^p — компоненты тензора пластических деформаций.

Качественно картины трещинообразования совпадают, только места инициации трещин на поверхности концентраторов немного сместились. Распространение трещин происходит в упругой области, следовательно, использование критерия квазихрупкого разрушения Гриффитса оправдано и в упругопластической модели. Появление зон пластических деформаций приводит к уменьшению жесткости конструкции, поэтому для получения прежней критической нагрузки необходимо верхнюю плиту смещать на $V_0 = 1{,}8$ мм.

Формирование полос локализованной деформации вблизи отверстий наблюдается в многочисленных экспериментах по деформированию горных пород, сыпучих сред, металлов. Пластические деформации, показанные на рис. 4, локализованы в довольно узких зонах и достигают значительных

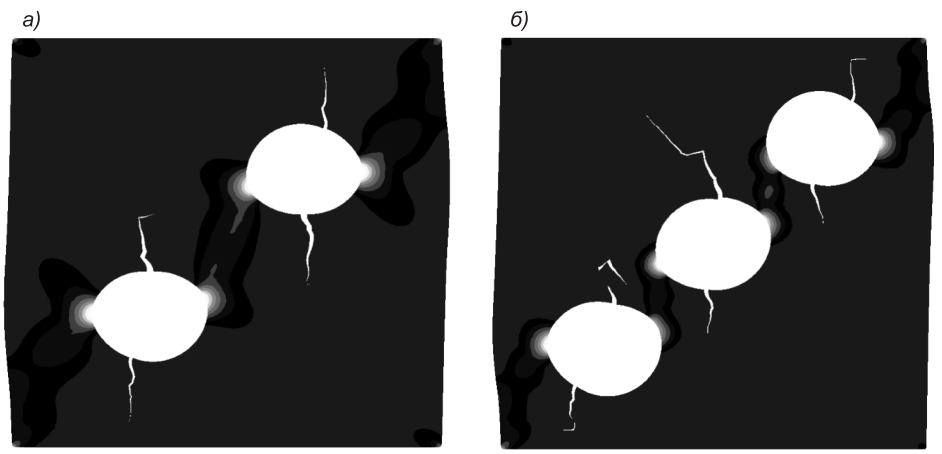


Рис. 4. Распространение трещин с поверхности концентраторов в упругопластической модели пластины с двумя (*а*) и с тремя (*б*) отверстиями

величин до 20 % на концах горизонтальных диаметров верхнего и нижнего отверстий, т.е. в областях максимальных сжимающих напряжений. В этих местах следует ожидать появление сдвиговых трещин в результате разрушения материала по механизму «сжатие + сдвиг». Компьютерное моделирование такого вида разрушений требует построения более сложной математической модели, учитывающей самоконтакт деформируемого тела, кроме того, концепция квазихрупкого разрушения Гриффитса здесь уже не проходит, для напряженных состояний преимущественного сжатия необходимо использовать другие критерии разрушения типа Кулона–Мора либо Друкера–Прагера.

Заключение. По результатам исследования можно сделать следующие выводы. Оргстекло в некотором смысле является аномальным материалом, по-разному сопротивляющемуся растяжению и сжатию. Наличие остаточных деформаций в образце после разгрузки подтверждается также результатами поляризационно-оптического эксперимента: при просмотре в поляризованном свете наблюдается картина полос интерференции, свидетельствующая о произведенном пластическом деформировании. Поэтому оргстекло трудно отнести к определенному типу квазихрупких или квазивязких материалов: при растяжении оргстекло скорее всего ведет себя квазихрупко, а при сжатии обнаруживает вязкие свойства.

Сравнение теоретических и экспериментальных результатов показывает, что обе математические модели (линейно-упругая и упругопластическая) адекватно описывают зарождение и развитие трещин с поверхности концентратора напряжений. В зоне растягивающих напряжений и та, и другая модели предсказывают распространение трещин нормального отрыва, качественно согласующееся с данными эксперимента. В областях сжимающих напряжений возникают зоны больших пластических деформаций, в которых возможное появление сдвиговых трещин требует использования более продвинутых подходов к описанию процесса разрушения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nesetova V., Lajtai E.Z. Fracture from compressive stress concentrations around elastic flaws // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1973. Vol. 10. P. 265–284.
2. Carter B.J., Lajtai E.Z., Yuan Y. Tensile fracture from circular cavities loaded in compression // Int. J. Fract. 1992. Vol. 57, No. 3. P. 221–236.
3. Yuan Y.G., Lajtai E.Z., Ayari M.L. Fracture nucleation from a compression-parallel, finite-width elliptical flaw // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1993. Vol. 30, No. 7. P. 873–876.
4. Ефимов В.П., Шер Е.Н. Метод определения трещиностойкости хрупких материалов расклиниванием // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1996. Т. 32, № 1. С. 26–30.
5. Коробейников С.Н. Нелинейное деформирование твердых тел. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 262 с.
6. MARC 2014. Volume A: Theory and Users Information. Santa Ana (CA): MSC.Software Corporation, 2014. 892 p.
7. Krueger R. Virtual crack closure technique: history, approach and applications // Appl. Mech. Rev. 2004. Vol. 57, No. 2. P. 109–143.

***Кургузов Владимир Дмитриевич**, д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail: kurguzov@hydro.nsc.ru*
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск
***Демешкин Александр Григорьевич**, канд. физ.-мат. наук, доц.*
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск

Получено после доработки 27.08.15

Kurguzov Vladimir Dmitrievich, DSc, professor; E-mail: kurguzov@hydro.nsc.ru, Lavrentyev Institute of hydrodynamics of Siberian Branch of Russian Academy of Science, Novosibirsk, Russia
Demeshkin Aleksandr Grigorievich, PhD, assistant professor, Lavrentyev Institute of hydrodynamics of Siberian Branch of Russian Academy of Science, Novosibirsk, Russia

CRACKS INITIATION ON A SURFACE OF STRESS CONCENTRATORS IN THE FORM OF CIRCULAR OPENINGS AT COMPRESSION OF SAMPLES FROM QUASIBRITTLE MATERIAL

Experiments on uniaxial loading of standard samples from plexiglas found in this material property of a different strength to tension and compression. Diagrams of deformation at tension and compression are constructed. Two mathematical models of deformation of plexiglas — linearly elastic and elastoplastic are offered. Results of experiments on fracture compression of the square plates from plexiglas containing circular openings are presented. Computer simulation of crack propagation from a surface of stress concentrators in geometrically nonlinear statement is carried out. Comparison of theoretical and experimental results showed that both mathematical models (linearly elastic and elastoplastic) adequately describe initiation and propagation of opening mode cracks from a surface of stress concentrators.

Keywords: plexiglas, stress concentrator, fracture, computer simulation.

REFERENCES

1. Nesetova V., Lajtai E.Z. Fracture from compressive stress concentrations around elastic flaws. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, 1973, Vol. 10, pp. 265–284.
2. Carter B.J., Lajtai E.Z., Yuan Y. Tensile fracture from circular cavities loaded in compression. Int. J. Fract, 1992, Vol. 57, No. 3, pp. 221–236.
3. Yuan Y.G., Lajtai E.Z., Ayari M.L. Fracture nucleation from a compression-parallel, finite-width elliptical flaw. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, 1993, Vol. 30, No. 7, pp. 873–876.
4. Efimov V.P., Sher E.N. Metod opredeleniya treshchinostoykosti khrupkikh materialov rasklinivaniem [Simple method of determining the crack resistance of brittle materials by wedging]. Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh [Journal of Mining Science], 1996, Vol. 32, No. 1, pp. 26–30 (rus.)
5. Korobeynikov S.N. Nelineynoe deformirovanie tverdykh tel [Nonlinear deformation of solids]. Novosibirsk, Izdatel'stvo SO RAN, 2000, 262 p. (rus.)
6. MARC 2014. Volume A: Theory and Users Information. — Santa Ana (CA): MSC. Software Corporation, 2014, 892 p.
7. Krueger R. Virtual crack closure technique: history, approach and applications // Appl. Mech. Rev, 2004, Vol. 57, No. 2, pp. 109–143.

УДК 624.072.012.45

В.В. РОДЕВИЧ, С.А. АРЗАМАСЦЕВ

К РАСЧЕТУ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ИЗГИБ С КРУЧЕНИЕМ

В статье приведены результаты исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов, подверженных изгибу с кручением, при котором проведен анализ существующих методик расчета конструкций при совместном действии изгибающих и крутящих моментов. Авторами выполнены экспериментальные исследования, позволившие определить достоверность аналитических расчетов. Численные исследования экспериментальных конструкций с использованием вычислительного комплекса LIRA позволили воссоздать напряженно-деформированное состояние конструкции, которое хорошо согласуется с результатами экспериментов. Для расчета конструкции по прочности предложены критерии разрушения конечно-элементной модели, адекватно описывающие реальную работу конструкции.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, железобетонные конструкции, изгиб с кручением, экспериментальные исследования, численные исследования, метод конечных элементов.

Железобетонные элементы, работающие в условиях сложного напряженного состояния, в строительной отрасли встречаются довольно часто. При проектировании зданий и сооружений очень важно правильно оценить условия эксплуатации проектируемой конструкции для того, чтобы определить методику ее расчета. Учет всех условий эксплуатации — сложная задача, требующая чаще всего комплексного и нетривиального решения.

К конструкциям, работающим в условиях сложного напряженно-деформированного состояния, относятся железобетонные конструкции, подверженные изгибу с кручением. Исследованиями таких конструкций, впервые проведенными более ста лет назад, занимались В.Н. Байков, И.В. Бахотский, Ц. Бах, А.А. Гвоздев, О. Граф, Э.Г. Елагин, Н.И. Карпенко, Д.Х. Касаев, В.И. Колчунов, Г.Д. Коуэн, Н.Н. Лессиг, И.М. Лялин, Е. Мерш, В.И. Морозов, В.И. Травуш, В.И. Фомичев, Ю.В. Чиненков и многие другие ученые [1–6]. Благодаря их усилиям были определены основные предпосылки и предложены расчетные зависимости для проектирования конструкций, подверженных изгибу с кручением. Огромным прорывом в области данных исследований стало предложение методики расчета прочности железобетонных элементов прямоугольного сечения при кручении и изгибе с кручением, основанной на методе предельного равновесия. Данная методика совершенствуется на протяжении многих десятилетий и включена во все последние редакции нормативных документов по проектированию железобетонных конструкций.

Несмотря на многочисленные исследования в данной области, вопрос проектирования конструкций на изгиб с кручением по второй группе

© Родевич В.В., Арзамасцев С.А., 2015

предельных состояний малоизучен и не отражен в действующих нормах проектирования. Более того, прочностной расчет конструкций, испытания которых проведены в лаборатории ТГАСУ в 2014 г. [7], по различным методикам показал значительно отличающиеся друг от друга результаты.

Для определения фактического напряженно-деформированного состояния были изготовлены и испытаны на изгиб с кручением две серии железобетонных балок. Балки размером 200×100×2000 мм армированы четырьмя стержнями, расположенными в углах поперечного сечения. Нижняя арматура представлена двумя стержнями Ø 14 мм, верхняя — двумя стержнями Ø 8 мм арматуры класса А500С. Поперечная арматура выполнена из замкнутых хомутов Ø 6 мм арматуры класса А240, установленных с шагом 50 мм в опорной зоне и шагом 100 мм в пролете конструкции. Бетон конструкции по прочности на сжатие соответствовал классу В25.

Испытания балок проводились на специальном стенде (рис. 1). Для этого на силовой пол на расстоянии 1,8 м друг от друга были установлены динамометрические опоры, позволяющие измерить опорную реакцию в любой момент приложения нагрузки. На опоры устанавливали образец с зафиксированными в третях пролета оголовниками, направленными в разные стороны. Поверх оголовников монтировали распределительную траверсу с закрепленным посредине датчиком силоизмерителя. Нагружение образца производили гидравлическим домкратом, установленным на датчик силоизмерителя и подключенным к насосной станции. Домкрат упирали в поперечную траверсу, которая совместно с тяжами образовывала замкнутую систему, передающую нагрузку на силовой пол. Такой стенд позволил воссоздать в средней части балки, на участке между оголовника-

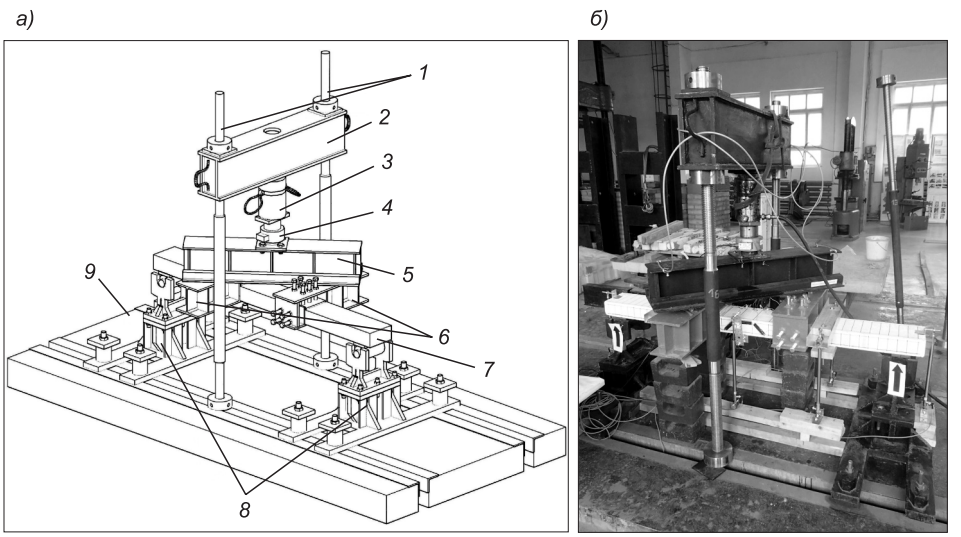


Рис. 1. Модель (*а*) и общий вид стенда (*б*) для испытания железобетонных элементов на изгиб с кручением

1 — тяжи; *2* – поперечная траверса; *3* — домкрат; *4* — датчик силоизмерительный; *5* — распределительная траверса; *6* — оголовники; *7* — образец; *8* — динамометрические опоры; *9* — силовой пол

ми, зону с постоянными по величине изгибающим и крутящим моментами, исключив влияние поперечной силы.

Опоры допускали свободный поворот концов балки, что давало возможность создавать постоянный крутящий момент, который определялся как произведение половины суммарной прикладываемой нагрузки на плечо. Для первой серии плечо принято величиной 0,25 м, что соответствует соотношению крутящего момента к изгибающему равному H_1 = 0,42; для второй серии плечо — 0,4 м и соответственно H_1 = 0,67. В данной работе рассматривался только случай изгиба с кручением, когда $H_1 \leq 1$.

При изготовлении образцов на продольные и поперечные стержни пространственных каркасов, в средней их зоне, были наклеены 12 тензометрических датчиков марки КФ 5П1-20-100-Б-12 с базой 20 мм (4 датчика на продольную арматуру и 8 — на поперечную). На боковую поверхность образцов после обетонирования и набора бетоном проектной прочности наклеили еще 6 тензометрических датчиков марки PL-60-11 с базой 60 мм. Для определения прогибов и углов закручивания в конструкции по длине балки устанавливали 5 электронных прогибомеров WayCon марки SL50-G-SR. Вся тензометрия и прогибомеры при испытании подключались к измерительным системам MIC-300M и MIC-400. Величина прикладываемой нагрузки контролировалась по монометру, датчику силоизмерителя и динамометрическим опорам.

Для определения угла закручивания в плоскости рассматриваемого сечения устанавливали два прогибомера, основание которых жестко фиксировали на силовом полу. Штоки приборов шарнирно крепили к тележкам, перемещающимся по балкам, закрепленным на образце вдоль плоскости рассматриваемого сечения. В результате снятия показаний с прогибомеров получали перемещения двух точек, расположенных на противоположных гранях образца или удаленных на одинаковые расстояния от этих граней. Среднее арифметическое данных перемещений определяется как прогиб конструкции в рассматриваемом сечении:

$$f_{\text{пр}} = \frac{f_{\max} + f_{\min}}{2}, \tag{1}$$

где $f_{\max}$ и $f_{\min}$ — значения вертикальных перемещений противоположных сторон испытуемого образца, соответственно максимальное и минимальное, а угол закручивания в данном сечении устанавливали по формуле:

$$\varphi_i = \operatorname{arctg}\left(\frac{f_{\max} - f_{\min}}{2L}\right). \tag{2}$$

Для данной расчетной схемы полный угол закручивания конструкции определялся как сумма углов закручивания двух половин конструкции, испытывающей воздействие двух разнонаправленных крутящих моментов:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2, \tag{3}$$

где φ_1 и φ_2 — абсолютные углы закручивания испытуемого образца на разных его концах вблизи оголовников.

В результате испытания железобетонных балок на совместное воздействие изгиба с кручением были определены деформации и напряжения, возникающие в арматуре и бетоне при действии внешней нагрузки, перемещения образца, обусловленные действием изгибающего и крутящего моментов, а также разрушающая нагрузка и характер разрушения конструкций.

Анализ результатов экспериментов показал, что разрушение образцов, подверженных изгибу с кручением, произошло с образованием пространственного сечения, заключенного между проходящей по трем растянутым граням «спиральной» трещиной и соединяющей начало с концом наклонной трещиной в сжатой от изгиба зоне. В момент разрушения конструкций в продольной нижней арматуре, растянутой от изгиба, достигнуты напряжения, равные пределу текучести арматуры. В верхней арматуре и хомутах развивались упругие деформации вплоть до разрушения образцов.

Сравнение результатов экспериментов с результатами прочностных расчетов, выполненных по различным методикам, позволило установить, что наиболее близкие к экспериментальным предельные значения изгибающего и крутящего моментов получены при расчете по способу, предложенному В.Н. Байковым, В.И. Фомичевым [8, 9]. Результаты аналитического расчета отличались от результатов эксперимента на 5–15 %.

Авторы способа предлагают рассчитывать такие конструкции по зависимостям, принятым в теории изгиба. В качестве прочностной характеристики арматуры предлагается вводить предел текучести арматуры с учетом понижающего коэффициента $k \leq 1$, обусловленного наличием крутящего момента наряду с изгибающим. Таким образом, учитывается более раннее наступление пластического состояния арматурной стали в условиях сложного напряженного состояния в сравнении с одноосным растяжением. Сущность способа заключается в определении данного коэффициента, который вычисляется из условия текучести Губера–Мизеса–Генки:

$$\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + 3\tau_{xz}^2 + 3\tau_{xy}^2 + 3\tau_{yz}^2 - \sigma_x\sigma_y - \sigma_y\sigma_z - \sigma_z\sigma_x = \sigma_{\text{Т}}^2. \quad (4)$$

Для данной задачи $\sigma_x = \sigma_y = 0$ и $\tau_{yz} = 0$, а условие (4) принимает вид:

$$\sigma_z^2 + 3\tau_{xz}^2 + 3\tau_{yz}^2 = \sigma_{\text{Т}}^2, \quad (5)$$

т.е рассматривается случай напряжения арматурной стали продольным растягивающим усилием и двумя касательными усилиями. Необходимо отметить, что расчетные зависимости для определения компонент левой части выражения (5) учитывают соотношение поперечной арматуры к продольной, а также соотношение крутящего момента к изгибающему введением соответствующих коэффициентов. Выразив данные зависимости через величину напряжения $\sigma_{\text{и}}$, возникающего в продольной арматуре, и подставив их в (5), получим выражение с одной неизвестной вида:

$$\sigma_{\text{и}} = k\sigma_{\text{Т}}. \quad (6)$$

Предельные величины изгибающих $\text{М}_{\text{и}}$ и крутящих моментов Т авторы предлагают определять в зависимости от величины $\sigma_{\text{и}}$ соответственно:

$$\text{М}_{\text{и}} = \sigma_{\text{и}} z_y A_s, \quad (7)$$

$$T = 2\tau_{xz} z_y A_s = H_1 \sigma_и z_y A_s. \quad (8)$$

В формулах (4)–(8) σ_x, σ_y, σ_z, τ_{xz}, τ_{xy}, τ_{yz} — соответственно нормальные и касательные напряжения в продольной арматуре;

$\sigma_Т$ — предел текучести арматурной стали;

$\sigma_и$ — прочностная характеристика стали с учетом понижающего коэффициента k, определяемого решением уравнения (5);

z_y — плечо внутренней пары сил;

A_s — площадь сечения продольной арматуры, расположенной у растянутой от изгиба грани;

H_1 — отношение крутящего момента к изгибающему.

Необходимо отметить, что предложенный В.Н. Байковым, В.И. Фомичевым способ расчета был подтвержден результатами экспериментов, проведенных авторами метода, а также опытами Ю.В. Чиненкова. Результаты экспериментов, выполненных авторами статьи, также показали хорошую согласованность с результатами расчета по приведенной выше методике.

Для анализа напряженно-деформированного состояния экспериментальных железобетонных балок было выполнено численное моделирование работы железобетонных элементов с соотношением H_1 = 0,42 и H_1 = 0,67, соответствующим экспериментальным. В качестве расчетной среды выбран программный комплекс «LIRA-SAPR 2013» (рис. 2), в котором реализована геометрическая нелинейность, а также известны случаи удачного его применения для моделирования физически нелинейных стержневых и оболочечных железобетонных элементов [10].

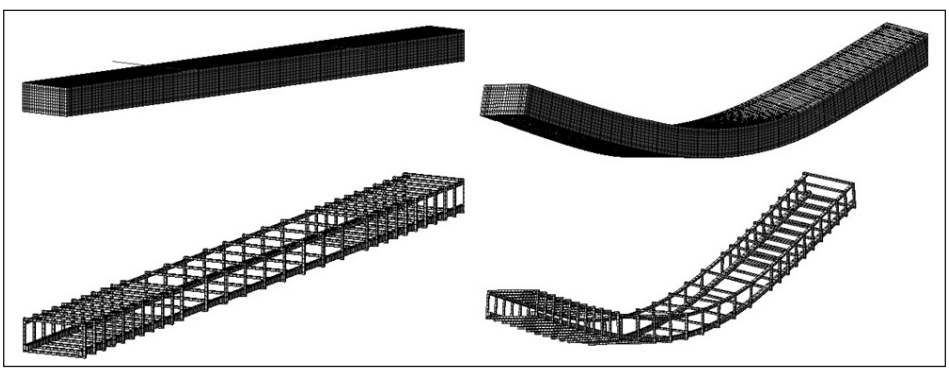


Рис. 2. Расчетные и деформационные схемы образца и арматурного каркаса

Работа железобетонных элементов, подверженных одновременному воздействию двух силовых факторов, таких как изгибающий и крутящий моменты, должна рассматриваться с позиции трехосного напряженного состояния, соответственно для моделирования подходят только объемные конечные элементы. В данных исследованиях арматура и бетон образца замоделированы объемными элементами с типом конечного элемента (КЭ) № 236, при этом арматурные стержни круглого сечения заменены на стержни прямоугольного сечения с площадью, эквивалентной площади круга. Характеристики жесткости заданы с учетом физической нелинейности материалов с использованием трехлинейной диаграммы по типу диаграммы

Прандтля для бетона и двухлинейной диаграммы состояния для арматуры с физическим пределом текучести классов А240 и А500С.

Моделирование опирания железобетонной балки осуществлялось с использованием одноузловых конечных элементов односторонней упругой связи, соответствующих типу КЭ № 261. Для данного типа КЭ указывается ось, вдоль которой работает связь, работа элемента (сжатие или растяжение), и предел по напряжению, превышая которое одноузловой элемент выключается из работы. Данный прием позволил учесть реальную работу железобетонного элемента на опоре по аналогии с экспериментом, позволив балке свободно поворачиваться относительно продольной оси.

Нагружение конструкции производилось двумя сосредоточенными силами, приложенными в третях пролета. Для создания эксцентриситета приложения нагрузки дополнительно введены стержневые элементы, свисающие консолью в противоположные стороны за боковые грани образца, на концы которых прикладывалась узловая нагрузка. Соединение стержневых элементов с объемными выполнено введением так называемых «пауков», которые представляют собой стержневые элементы, обладающие общими узлами с объемными элементами. Таким образом, происходит перераспределение напряжений с исключением возможности их концентрации на отдельных участках.

Расчет конструкции выполнен с использованием шагово-итерационного метода расчета. Нагрузка прикладывалась ступенями в равных долях, при этом по результатам расчета на каждой ступени можно отследить качественную и количественную картину напряжений и перемещений, возникающих при нагружении конструкции. Кроме того, программа в автоматическом режиме на каждом шаге расчета отмечает разрушенные элементы и элементы, в которых образовались трещины.

По результатам расчета авторами определены напряжения в продольных и поперечных стержнях арматурного каркаса (рис. 3). Полученная картина напряжений соответствует принятым предпосылкам расчета, что подтвер-

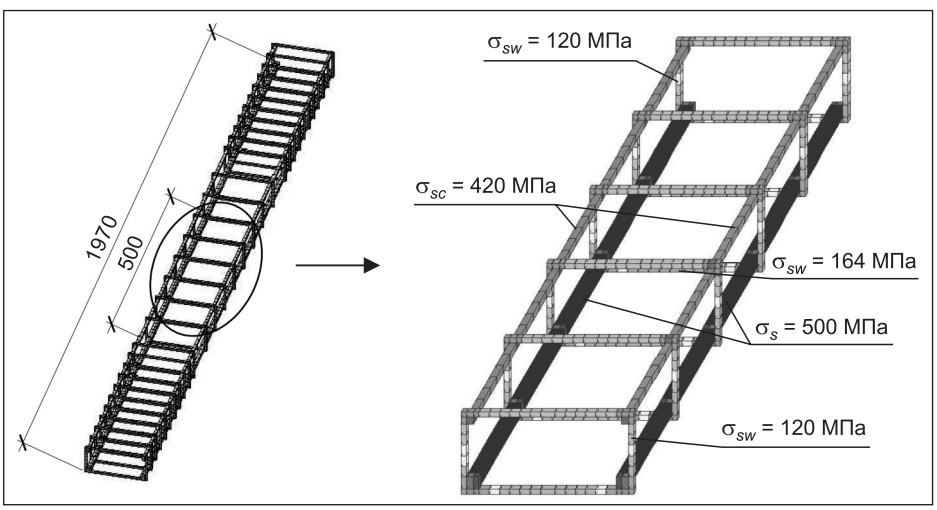


Рис. 3. Напряжения в арматурных стержнях на расчетном участке при контрольной разрушающей нагрузке $P_{разр}$ (для балки первой серии)

ждает достоверность результатов. Во-первых, при величине нагрузки $P_{разр}$, соответствующей разрушению экспериментальных образцов, в продольной растянутой от изгиба арматуре напряжения достигли предела текучести. Во-вторых, максимальные касательные напряжения возникают у наибольшей стороны поперечного сечения, о чем свидетельствуют величины напряжений на вертикальных и горизонтальных участках хомутов. В-третьих, по положению максимальных величин напряжений в поперечной арматуре можно сделать вывод о формировании пространственного сечения, что подтверждено и качественной картиной деформаций образца (см. рис. 2).

Анализ результатов расчета и сопоставление их с экспериментальными данными позволили установить, что перемещения, полученные расчетным путем, с достаточной сходимостью согласуются с результатами эксперимента (рис. 4). Так, величина прогиба в середине пролета по результатам численного моделирования конструкции составила 25,421 мм для балки с H_1 = 0,42 и 15,137 мм для балки с H_1 = 0,67. По результатам испытаний прогиб образцов первой серии составил 22,923 и 26,92 мм, что не превышает разницы в 11 % по сравнению с расчетом. Прогиб образцов второй серии — 17,599 и 15,397 мм, что не превышает разницы в 16 %.

При численном исследовании экспериментальных образцов установлено, что углы закручивания, определенные по формулам (2) и (3), хорошо согласуются с углами закручивания, полученными при испытании конструкций (см. рис. 4). Расхождения в результатах эксперимента и расчета

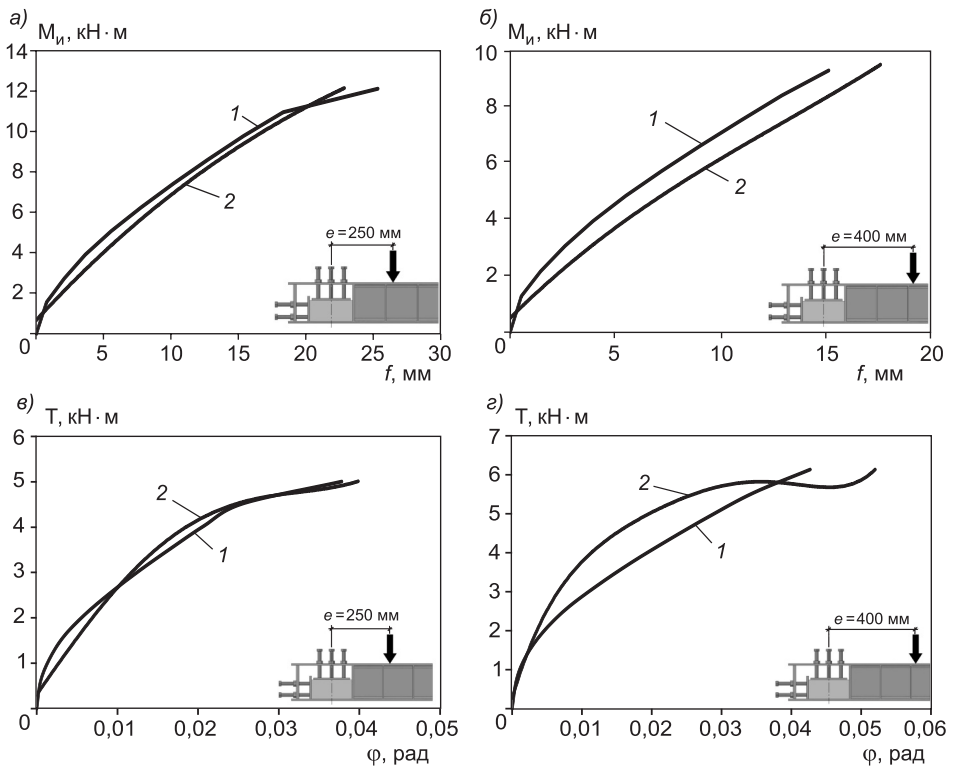


Рис. 4. Графики прогибов и углов закручивания для образцов первой (*а*, *в*) и второй (*б*, *г*) серии

1 — расчет МКЭ; *2* — эксперимент

для балок первой серии не превысили 10 %, для балок второй серии — 15 %.

При достижении величины нагрузки, соответствующей разрушению экспериментального образца $P_{разр}$, расчет конструкции не останавливался, несмотря на огромное количество разрушенных объемных элементов. Происходило это из-за того, что при выключении элемента из работы воспринимаемые им усилия распределялись на соседние элементы, а конструкция, в целом, оставалась геометрически неизменяемой. Однако анализ напряжений при воздействии внешней нагрузки $P_{разр}$ показал, что напряжения в нижней растянутой арматуре достигли значения предела текучести, в то время как напряжения в верхней арматуре и хомутах значительно меньше предела текучести.

Подобная картина напряженно-деформированного состояния наблюдалась и при проведении эксперимента: разрушение образцов происходило при достижении нижней арматурой предела текучести. В связи с вышеизложенным в качестве основного критерия разрушения железобетонной конструкции при моделировании ее работы на изгиб с кручением с использованием вычислительного комплекса «LIRA-SAPR 2013» можно предложить достижение продольной растянутой арматурой физического предела текучести (при испытании рассматривалась стержневая арматура только с физическим пределом текучести). Таким образом, определение разрушающей нагрузки с помощью вычислительных комплексов, использующих МКЭ, необходимо производить последовательным подбором нагрузки и оценкой напряжений в продольной арматуре на каждом этапе нагружения. За разрушающую нагрузку в данном случае следует принимать минимальное ее значение, при котором напряжения в продольной арматуре достигнут предела текучести.

Авторами дополнительно выполнен аналитический расчет экспериментальных образцов по СП 63.13330.2012 и по способу, предложенному В.Н. Байковым, В.И. Фомичевым [8, 9], при значениях H_1 в пределах 0,1…0,9 с шагом 0,1. Также осуществлен расчет МКЭ объемной модели с этими же значениями отношения крутящего момента к изгибающему, при котором определены сочетания $M_и$ и T, соответствующие достижению предела текучести продольной растянутой от изгиба арматурой. Сравнение результатов расчетов представлено на рис. 5. Отклонение значений предельных усилий, определенных МКЭ, от значений, полученных по способу В.Н. Байкова, В.И. Фомичева, колеблется в пределах 5–10 %. Отклонение результатов испытания от результатов расчетов по действующему СП составило 20–25 %. Данное расхождение в результатах, по мнению авторов, связано с неучетом касательных усилий, возникающих в продольной арматуре, которые учтены при расчете по способу [8, 9] и МКЭ с использованием пространственной расчетной модели.

Предложенная численная модель для оценки напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов, работающих на изгиб с кручением, позволяет с достаточной точностью определить деформации, возникающие в конструкциях. Несмотря на то что механизм учета нелинейности недостаточно освещен и остается до конца неясным, а также отсут-

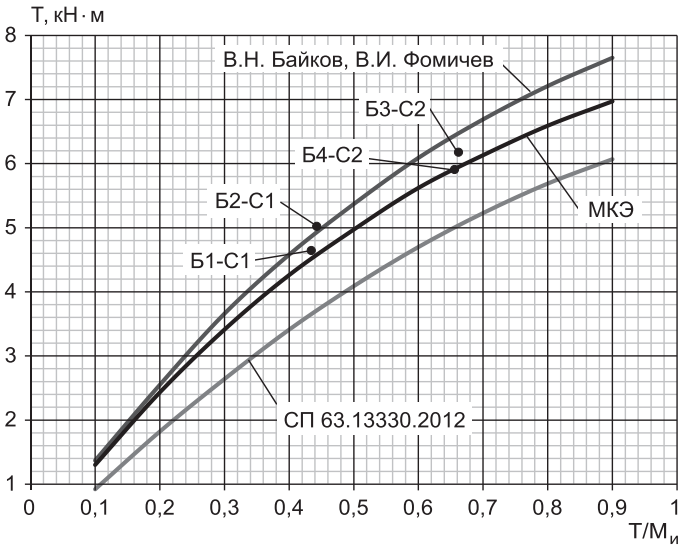


Рис. 5. Сравнение результатов экспериментов с результатами расчетов

ствует критерий прочности, автоматически приостанавливающий процедуру расчета, данная модель может быть применена и при прочностном расчете с постоянным контролем напряжений в отдельных элементах конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меркулов С.И., Стародубцев С.В. Экспериментальные исследования стержневых железобетонных элементов составного сечения, подвергнутых изгибу с кручением // Строительство и реконструкция. 2012. № 2. С. 20–24.
2. Коуэн Г.Д. Кручение в обычном и предварительно-напряженном железобетоне. М., 1972. 104 с.
3. Касаев Д.Х. Прочность железобетонных элементов таврового сечения при изгибе с кручением // Бетон и железобетон. 2005. № 3. С. 19–21.
4. Бахотский И.В. Теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния фиброжелезобетонных элементов, подверженных воздействию кручения с изгибом // Материалы 5-й междунар. конф. «Актуальные проблемы архитектуры и строительства»: в 2 ч. Ч. 1. СПб.: СПбГАСУ, 2013. С. 163–169.
5. Рауш Э. Расчет железобетона на кручение и срез. М.: Гл. ред. строит. лит., 1936.
6. Vishnu H. Jariwala, Paresh V. Patel, Sharadkumar P. Purohit. Strenghthening of RC beams subjected to combined torsion and bending with GFRP composites // Procedia Engineering. 2013. No. 51. P. 282–289.
7. Родевич В.В., Арзамасцев С.А. Экспериментальные исследования железобетонных элементов, работающих на изгиб с кручением, при статическом и кратковременном динамическом воздействиях // Жилищное строительство. 2014. №10. С. 15–18.
8. Байков В.Н. Исследование железобетонных элементов, подверженных изгибу и кручению с учетом снижения предела текучести сложнонапряженной арматуры // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1975. № 1. С. 11–17.
9. Байков В.Н., Фомичев В.И. Исследование несущей способности железобетонных элементов прямоугольного сечения при совместном действии изгиба и кручения // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1975. № 2. С. 19–25.

10. Пащанин А.А. Расчет экспериментальных железобетонных балок при действии поперечных сил с использованием объемных конечных элементов // Бетон и железобетон. 2011. Вып. 6.

***Родевич Виктор Викторович**, канд. техн. наук, доц.*
Томский государственный архитектурно-строительный университет
***Арзамасцев Сергей Александрович**, асп.*
Томский государственный архитектурно-строительный университет

Получено после доработки 03.08.15

Rodevich Victor Victorovich, PhD, assistant professor, Tomsk State University of Architecture and Building, Russia
Arzamastsev Sergey Aleksandrovich, post-graduate student, Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

BY THE CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER BEND WITH TORSION

The results of the research of stress-strain state of reinforced concrete elements subjected to bending with torsion. For this by existing methods of calculation of structures under the combined action of bending and torque an analysis was carry out. Performed by the authors experimental studies allowed to determine the accuracy of the analytical carried out calculations. Numerical studies of experimental designs using computer system LIRA allowed providing the tense deformed state of the structure, which is in good precision with experimental results. To calculate of durability was proposed the criteria by the destruction of the finite element model, which adequately describe the real construction work.

Keywords: intense deformation, reinforced concrete structures, the bending with torsion, experimental studies, numerical studies, finite element method.

REFERENCES

1. Merkulov S.I., Starodubtsev S.V. Eksperimental'nye issledovaniya sterzhnevykh zhelezobetonnykh elementov sostavnogo secheniya, podvergnutykh izgibu s krucheniem [Experimental studies of bar concrete elements of the composite cross-section subjected to bending with torsion]. Stroitel'stvo i reconstruktsiya [Construction and reconstruction], 2012, No. 2, pp. 20–24 (rus.)
2. Cowan Henry J. Kruchenie v obychnom i predvaritel'no-napryazhennom zhelezobetone [Torsion in normal and pre-stressed concrete]. M., 1972. 104 p. (rus.)
3. Kasaev D.H. Prochnost' zhelezobetonnykh elementov tavrovogo secheniya pri izgibe s krucheniem [Strenghthening of reinforced concrete elements of T-section in bending and torsion]. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete], 2005, No. 3, pp. 19–21 (rus.)
4. Bahotskiy I.V. Theoreticheskoe issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyania fibrozhelezobetonnykh elementov, podverzhennykh vozdeystviyu krucheniya s izgibom [Theoretical study of stress-strain state fiber reinforced concrete elements subject to torsion with bending]. Materialy 5-y mezhdunarodnoy konferentsii «Actual′nye problemy arkhitektury i stroitel′stva» [Materials V-th International Conference «Actual problems architecture and building»] SPb., SPbSUAB, 2013, pp. 163–169 (rus.)

5. Raush E. Raschet zhelezobetona na kruchenie i srez [Calculation of reinforced concrete by torsional and shear]. M., Main Editorial construction literature, 1936 (rus.)
6. Vishnu H. Jariwala, Paresh V. Patel, Sharadkumar P. Purohit. Strenghthening of RC beams subjected to combined torsion and bending with GFRP composites. Procedia Engineering, 2013, No. 51, pp. 282–289.
7. Rodevich V.V., Arzamastsev S.A. Eksperimental′nye issledovaniya zhelezobetonnykh elementov, rabotayushchikh na izgib s krucheniem, pri staticheskom i kratkovremennom dinamicheskom vozdeystviyakh [Experimental study of reinforced concrete elements subjected to bending with torsion, under static and dynamic effects]. Zhilishchnoe stroitel′stvo [House building], 2014, No. 10, pp. 15–18 (rus.)
8. Baikov V.N. Issledovanie zhelezobetonnykh elementov, podverzhennykh izgibu i krucheniyu s uchetom snizheniya predela tekuchesti slozhnonapryazhennoy armatury [Study of reinforced concrete elements subjected to bending and torsion in terms of reduction of yield strength is difficult stressed reinforcement]. Izvestiya vuzov. Stroitel′stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture], 1975, No. 1, pp. 11–17 (rus.)
9. Baikov V.N., Fomichev V.I. Issledovanie nesushchey sposobnosti zhelezobetonnykh elementov pryamougol′nogo secheniya pri sovmestnom deystvii izgiba i krucheniya [Research of carrying capacity of concrete elements of rectangular cross section under the combined action of bending and torsion]. Izvestiya vuzov. Stroitel′stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture], 1975, No. 2, pp. 19–25 (rus.)
10. Pashchanin A.A. Raschet eksperimental′nykh zhelezobetonnykh balok pri deystvii poperechnykh sil s ispol′zovaniem ob″emnykh konechnykh elementov [Calculation of experimental reinforced concrete beams under the action of shear forces using volumetric finite elements]. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete], 2011, No. 6 (rus.)

УДК 697.932.001

Р.Г. САФИУЛЛИН, В.Н. ПОСОХИН

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ КАПЕЛЬ ПРИ РАСПЫЛИВАНИИ ЖИДКОСТИ ПОРИСТЫМИ ВРАЩАЮЩИМИСЯ РАСПЫЛИТЕЛЯМИ

Часть 1. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ КАПЕЛЬ В НЕПОДВИЖНОМ ВОЗДУХЕ

Приведены результаты численного моделирования траекторий движения капель, формируемых пористыми вращающимися распылителями систем доувлажнения воздуха в помещении. Получена зависимость дальности разлета капель от их объема, учитывающая испарение капель вдоль траектории падения.

Ключевые слова: пористый вращающийся распылитель, траектории капель, дальность полета капель.

Эффективность систем доувлажнения воздуха в помещениях существенно зависит от монодисперсности и тонкости распыла. С этой точки зрения большой потенциал имеют пористые вращающиеся распылители (ПВР). В работе [1] показано, что при окружных скоростях вращения выше 20 м/с и правильно организованном подводе воды ПВР из мелкодисперсных пористых материалов способен формировать капли размером 20–30 мкм. При этом создается практически монодисперсный факел распыла, в котором размер самых больших и мелких капель отличается не более чем в 2 раза.

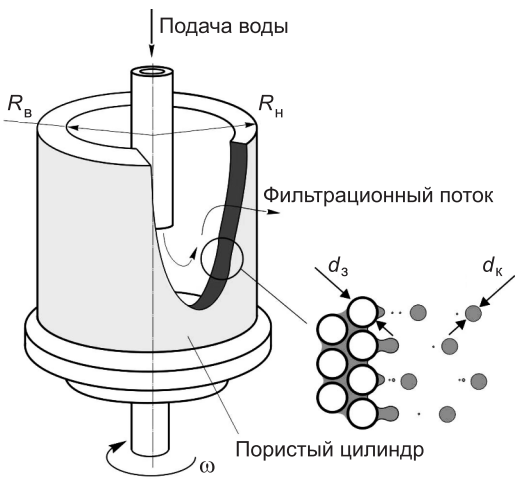


Рис. 1. Схема каплеобразования на зернах ПВР

Схематично ПВР представляет собой полый пористый цилиндр, вращающийся вокруг своей продольной оси (рис. 1). Во внутреннюю полость распылителя подается жидкость, которая под действием центробежной силы фильтруется сквозь пористую стенку цилиндра и практически одноразмерными каплями сбрасывается с зерен на его внешней поверхности.

Основные задачи расчета увлажнительных систем на основе ПВР заключаются в определении размеров образующихся капель и радиуса их разлета из условия недопущения попадания капель в рабочую зону и на ближайшие строительные конструкции.

© Сафиуллин Р.Г., Посохин В.Н., 2015

Первую задачу позволяет решить модель каплеобразования на зерне ПВР, описанная в работе [2]. Установлено, что на конечный размер капель в распыле ПВР влияют свойства жидкости (плотность $\rho_ж$, вязкость $\mu_ж$ и поверхностное натяжение σ), а также структура материала стенок — пористость *por* и размер поверхностных зерен $d_з$. Тонкость распыла при смачивании определяется соотношением скорости вращения распылителя ω и скорости подпитки поверхностных зерен жидкостью (скорости фильтрации через пористую структуру ПВР — $v_ф$):

$$v_ф = \frac{\chi}{\mu_ж} \frac{\rho_ж \omega^2}{2} \frac{R_н^2 - R_в^2}{\ln(R_н / R_в)} \frac{1}{R_н}, \qquad (1)$$

где $R_н$ и $R_в$ — наружный и внутренний радиусы ПВР (см. рис. 1);
χ — проницаемость материала ПВР, связанная с размерами зерна $d_з$ и пористостью *por* формулой Козени

$$\chi = \beta \frac{por^3}{(1 - por)^2} d_з^2;$$

$\beta = 3 – 6$ — опытный коэффициент.

Численное исследование динамики процесса каплеобразования на зернах ПВР показало [2], что безразмерные отрывные объемы капель $\bar{V}_к = V_к / c^3$ (c — капиллярная постоянная жидкости) увеличиваются с ростом σ и уменьшаются при возрастании скорости вращения распылителя ω, а увеличение размеров зерен ПВР $d_з$ и поверхностной пористости материала приводит к повышению $\bar{V}_к$ (рис. 2).

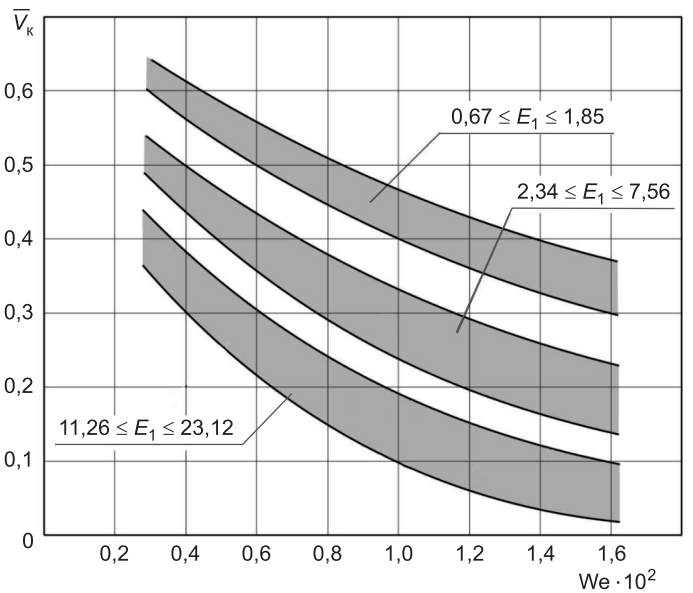


Рис. 2. Зависимость для определения объемов капель $\bar{V}_к$, формирующихся на зернах ПВР

На рис. 2 обозначены $\mathrm{We} = \dfrac{\rho_ж d_3 v_ф^2}{2\sigma}$ (число Вебера) и $E_1 = \dfrac{d_3^2 \omega^2}{4 v_ф^2}$ — критерии, характеризующие соответственно относительный вклад в динамику каплеобразования на зерне ПВР силы поверхностного натяжения жидкости и центробежной силы.

Аппроксимация расчетных кривых на рис. 2 дает следующую зависимость для определения безразмерных объемов капель:

$$\bar{V}_к = 789{,}85\mathrm{We}^2 E_1^{0{,}245} - \mathrm{We}(0{,}062E_1^2 - 2{,}28E - 34{,}9) + 0{,}728E_1^{-0{,}1}. \qquad (2)$$

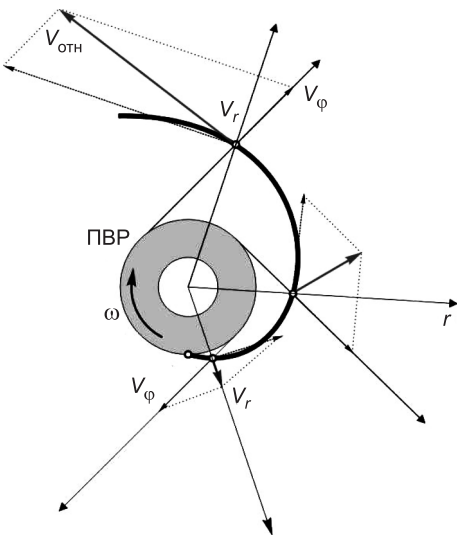


Рис. 3. Схема скоростей и относительного перемещения капли от ПВР в неподвижном воздухе

Уравнение (2) позволяет определить дисперсность распыла в системах доувлажнения воздуха на основе ПВР.

Задачу расчета траекторий полета капель, образующихся в факеле распыла ПВР, можно значительно упростить, приняв, что при малых объемных концентрациях капель в воздухе межфазное взаимодействие и движение дисперсного потока в факеле распыла описывается поведением отдельно взятой капли (рис. 3).

Уравнения движения одиночной сферической капли в цилиндрической системе координат, связанной с ПВР (ось распылителя совпадает с осью z системы координат), имеют вид:

$$\begin{cases} m_к\left(\dfrac{dv_r}{d\tau} - \dfrac{dv_\varphi^2}{r}\right) = F_r; \\ m_к\left(\dfrac{dv_\varphi}{d\tau} - \dfrac{v_r v_\varphi}{r}\right) = F_\varphi; \\ m_к\left(\dfrac{dv_z}{d\tau}\right) = F_z; \\ \dfrac{dr}{d\tau} = v_r; \ \dfrac{d\varphi}{d\tau} = \dfrac{v_\varphi}{r}; \ \dfrac{dz}{d\tau} = v_z, \end{cases} \qquad (3)$$

где v_r, v_φ, v_z — компоненты скорости капли;

F_r, F_φ, F_z — составляющие суммы внешних сил (силы аэродинамического сопротивления воздуха, тяжести, центробежная сила, силы Магнуса, Бассе, Мещерского, Кориолиса и др.);

τ — текущее время;

r, φ, z — цилиндрические координаты.

Учитывая, что существенное влияние на движение капель от ПВР в воздухе помещения оказывают силы тяжести, аэродинамического сопротивления, Кориолиса и центробежная сила, система уравнений (3) для капли массой $m_к = \rho_ж \pi d_к^3 / 6$ запишется в виде [3]:

$$\begin{cases} \dfrac{dv_r}{d\tau} = \dfrac{v_\varphi^2}{r} + \dfrac{\rho_г}{\rho_ж}\left(\dfrac{3}{4}\xi_к \dfrac{v_{отн}}{d_к}(u_r - v_r)\right); \\ \dfrac{dv_\varphi}{d\tau} = -\dfrac{v_r v_\varphi}{r} + \dfrac{\rho_г}{\rho_ж}\left(\dfrac{3}{4}\xi_к \dfrac{v_{отн}}{d_к}(u_\varphi - v_\varphi)\right); \\ \dfrac{dv_z}{d\tau} = g + \dfrac{\rho_г}{\rho_ж}\left(\dfrac{3}{4}\xi_к \dfrac{v_{отн}}{d_к}(u_z - v_z)\right); \\ \dfrac{dr}{d\tau} = v_r; \quad \dfrac{d\varphi}{d\tau} = \dfrac{v_\varphi}{r}; \quad \dfrac{dz}{d\tau} = v_z, \end{cases} \tag{4}$$

где $d_к$ — диаметр капли;
$\rho_г$ — плотность воздуха;
$v_{отн}$ — скорость движения капли относительно воздуха;

$$v_{отн} = \sqrt{(u_r - v_r)^2 + (u_\varphi - v_\varphi)^2 + (u_z - v_z)^2}\ ,$$

u_r, u_φ, u_z — компоненты скорости воздуха.

Из входящих в уравнения (4) сил наибольшее влияние на движение капли в помещении оказывает сила аэродинамического сопротивления, направленная в сторону, противоположную направлению вектора относительной скорости капли $v_{отн}$. Для расчета этой силы необходимы сведения о значениях коэффициента аэродинамического сопротивления капли $\xi_к$ в широком диапазоне скоростей $v_{отн}$ и чисел Рейнольдса $\mathrm{Re} = \dfrac{d_к\, v_{отн}}{\nu_г}$ ($\nu_г$ — кинематическая вязкость воздуха), характерных для условий распыливания в неподвижном воздухе помещений. В этом случае наиболее подходящей является формула Холтермана, полученная в работе [4] аппроксимацией многочисленных экспериментальных данных:

$$\xi_к = \left(\left(\frac{24}{\mathrm{Re}}\right)^{0,52} + 0,553\right)^{\frac{1}{0,52}}. \tag{5}$$

Особенность движения капли в воздухе помещения в том, что масса капли в полете уменьшается при испарении. Поэтому инерционную часть уравнений движения капли (4) необходимо корректировать по времени. При испарении в воздух для скорости уменьшения диаметра $d_к$ капли можно использовать формулу Вильямсона [5], дающую наиболее близкие к экспериментам результаты:

$$\frac{dd_к}{d\tau} = \frac{-4m_ж D}{d_к \rho_ж RT}\Delta P(1 + 0,276\,\mathrm{Re}^{1/2}\,\mathrm{Sc}^{1/3}), \tag{6}$$

где $m_ж$ — молекулярный вес воды;
T — средняя абсолютная температура в пограничном слое капли;
ΔP — разность между давлением пара вблизи капли и в окружающем воздухе;
R — газовая постоянная воздуха;
$\mathrm{Sc} = \frac{\nu_г}{D}$ — число Шмидта;
D — коэффициент диффузии молекул пара в насыщенный слой воздуха вокруг капли.

При испарении воды в воздух вентилируемых помещений параметры, входящие в уравнение (6), такие как плотность воздуха и воды, вязкость воздуха, коэффициент диффузии пара, мало меняются с изменением температуры. Исключением является разность давлений ΔP, которая действует как «движущая сила» для транспортировки пара от поверхности капли. В численных расчетах систем «воздух–капля воды» удобно выразить ΔP через парциальное давление пара при температуре окружающей среды (воздуха) $T_с$ и температуре мокрого термометра $T_м$ соответственно.

Для определения давления водяного пара над искривленной поверхностью малой капли применима формула Томсона (Кельвина)

$$P_к = P_{н.п} \exp\left(\frac{\sigma m_ж}{d_к \rho_ж k T_ж}\right), \tag{7}$$

где $P_{н.п}$ — давление насыщенного пара над плоской поверхностью воды;
k — постоянная Больцмана.

Зависимость давления насыщенных паров воды над плоской поверхностью от температуры окружающего воздуха хорошо описывается эмпирическим выражением

$$P_{н.п} = 610{,}7 \cdot 10^{7{,}5T/(T+273{,}3)}, \tag{8}$$

здесь 610,7 Па — давление насыщенного пара при 0°.

Выражение для парциального давления пара по сухому термометру для этих температур предложено Р. Листом в работе [6]:

$$P_п = P_{н.п} - \gamma(T_с - T_м), \tag{9}$$

где γ — постоянная, зависящая от атмосферного давления B и температуры мокрого термометра $T_м$:

$$\gamma = 0{,}00066B\,(1 + 0{,}00115T_м).$$

Для численного расчета скорости испарения также необходимо иметь зависимость температуры смоченного термометра $T_м$ от температуры $T_с$ и относительной влажности воздуха φ. Для всех φ при $T_с$ = 10–20 °С эта зависимость хорошо описывается уравнением

$$T_м = T_с - [(a_0 + a_1T_с) + (b_0 + b_1T_с)\varphi + (c_0 + c_1T_с)\varphi^2] \tag{10}$$

с постоянными

$$a_0 = 5{,}1055;\ a_1 = 0{,}4295;\ b_0 = -0{,}04703;\ b_1 = -0{,}005951;$$

$$c_0 = -4{,}005;\ c_1 = 1{,}66 \cdot 10^{-5}.$$

Приведем также известные уравнения, которые были использованы для оценки других параметров, влияющих на процесс испарения капель:

— плотность воды

$$P_ж = 1000{,}0 - 0{,}00653(T_ж - 3{,}98)^2; \quad (11)$$

— кинематическая вязкость воды

$$\nu_ж = (17{,}1 + 0{,}067T_ж - 0{,}0004T^2_ж) \cdot 10^{-6}; \quad (12)$$

— коэффициент диффузии водяных паров в воздухе

$$D = 21{,}2 \cdot 10^{-6}(1 + 0{,}0071T_ж). \quad (13)$$

Большинство из этих величин в диапазоне температур окружающей среды $T_с$ = 0–20 °С изменяются незначительно.

Алгоритм расчета системы уравнений (1)–(13) был реализован в виде кода программы «DropCalc-3» на языке С++. Программа позволяет определять траектории капель при заданных геометрических и физических параметрах материала ПВР, физических свойствах жидкости и воздуха, скорости вращения распылителя.

Система уравнений движения капли (4) совместно с уравнением изменения диаметра капли при испарении (6) была решена численно с использованием метода Рунге–Кутта четвертого порядка точности при начальных условиях:

$$\tau = 0,\ \ r = R_н,\ \ \varphi = 0,$$
$$z = 0,\ \ v_r = v_\varphi,$$
$$v_\varphi = \omega R_н = \frac{2\pi n R_н}{60},\ v_z = 0, \quad (14)$$

здесь n — число оборотов ПВР.

Расчеты проводились для случая распыления воды с помощью ПВР наружным радиусом $R_н$ = 0,04–0,12 м и внутренним $R_в$ = 0,02–0,08 м, материал распылителя имел зернистость $d_з$ = 10 – 400 мкм и пористость por = 0,3–0,4.

Результаты численного расчета траекторий капель, формируемых с помощью ПВР-400 (размер зерна 400 мкм) в неподвижном воздухе, приведены на рис. 4. Из рис. 4 видно, что факел распыленной жидкости представляет собой горизонтальный веер, из которого с относительно небольшой скоростью свободно падают вниз под действием силы тяжести капли, теряющие свою первоначальную скорость в горизонтальном направлении.

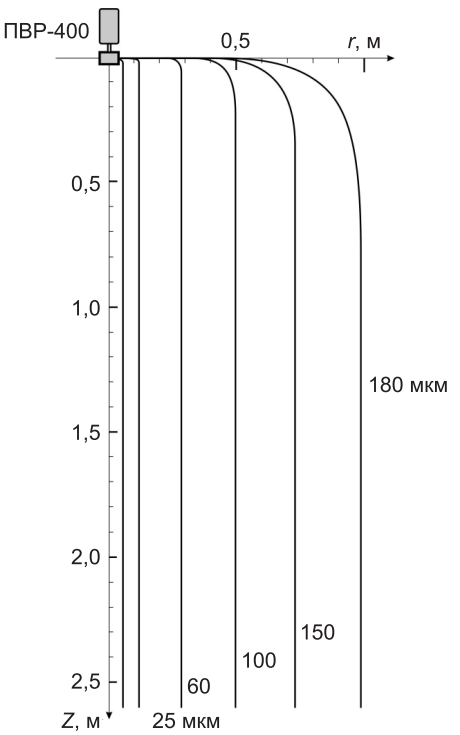


Рис. 4. Траектории капель в неподвижном воздухе (φ = 50 %) при распыливании воды с помощью ПВР-400, $R_н$ = 0,05 м, n = 6000 об/мин

Влияние влажности φ и температуры воздуха T_c на время испарения капель воды при их движении в неподвижном воздухе иллюстрирует рис. 5. Из рис. 5 видно, что при разных комбинациях T_c и φ капли в воздухе могут испаряться до 3 раз медленнее.

Анализ характера траекторий капель при разных окружных скоростях вращения ПВР v_p показал, что радиус разлета капель R в большей степени зависит от тангенциальной (окружной) скорости v_φ и в меньшей от радиальной скорости капли v_r в момент отрыва с зерен ПВР. Так, у ПВР-400 при $v_\varphi = 10$ м/с к моменту времени $\tau = 0{,}002$ с капля от скорости $v_{r0} = 0{,}02$ м/с разгоняется до $v_r = 5{,}55$ м/с, а от $v_{r0} = 1{,}0$ м/с — до $v_r = 5{,}67$ м/с.

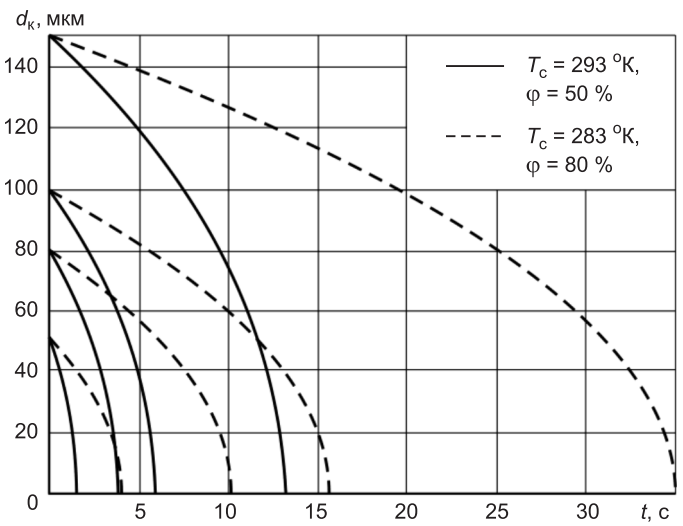


Рис. 5. Влияние влажности и температуры воздуха на время испарения капель воды при их движении в неподвижном воздухе

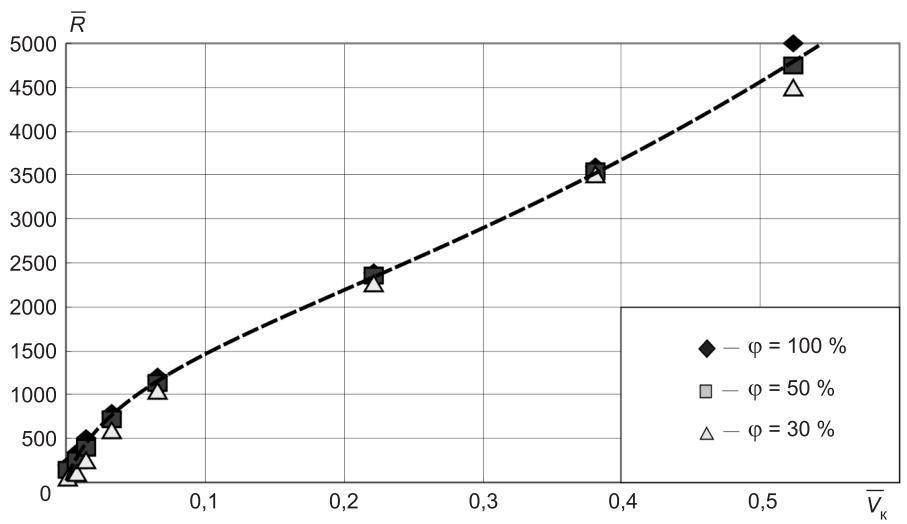


Рис. 6. Зависимость разлета капель $\overline{R}$ в неподвижном воздухе от объема капель $\overline{V}_к$

Рис. 6 иллюстрирует полученную в численных экспериментах зависимость дальности разлета капель $\bar{R} = R/r_з$ ($r_з$ — радиус зерна ПВР) от объема капель $\bar{V}_к = f(\mathrm{We}, E_1)$.

Аппроксимация расчетной кривой на рис. 6 дает следующую зависимость дальности разлета капель от их объема:

$$\bar{R} = 41979\bar{V}_к^3 - 36029\bar{V}_к^2 + 16296\bar{V}_к + 148{,}1. \quad (15)$$

Зависимость (15) рекомендуется для расчета геометрии факела распыла ПВР в системах доувлажнения воздуха в помещениях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сафиуллин Р.Г., Протопопов В.А. О дисперсных характеристиках пористых вращающихся распылителей на основе абразивных материалов // Изв. вузов. Строительство. 2008. № 5. С. 115–119.
2. Николаев Н.А., Посохин В.Н., Салимов Н.Б., Сафиуллин Р.Г. Динамика формирования капель при фильтрации через пористое тело // Теоретические основы химической технологии. 2004. Т. 38, № 4. С. 441–445.
3. Склабинский В.И. Определение гидродинамических характеристик дисперсной фазы в малогабаритных вихревых аппаратах // Вісн. КДПУ ім. Михайла Остроградского. 2009. Вып. 6(59). Ч. 1. С. 196–201.
4. Holterman H.J. Kinetics and evaporation of water drops in air // Wageningen: IMAG (Report 2003-12). Wageningen UR: Institut voor Milieu en Agritechniek, 2003.
5. Williamson R.E., Threadgill E.D. A simulation for the dynamics of evaporating spray droplets in agricultural spraying // Transactions of the ASAE. 1974. No 17. P. 254–261.
6. List R.J. Smithsonian Meteorological Tables — 6th revised ed., 1st reprint // Smithsonian Miscellaneous Collections, City of Washington, USA, 1958. Vol. 114.

***Сафиуллин Ринат Габдуллович**, д-р техн. наук, доц.; E-mail: safiullin_rinat@mail.ru*
Казанский государственный архитектурно-строительный университет
***Посохин Владимир Николаевич**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: posohin@ksaba.ru*
Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 28.08.15

Safiullin Rinat Gabdullovich, DSc, assistant professor; E-mail: safiullin_rinat@mail.ru, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia
Posokhin Vladimir Nikolaevich, DSc, professor; E-mail: posohin@ksaba.ru, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

NUMERICAL SIMULATION OF DROPLET MOTION DURING ATOMIZATION OF LIQUID BY POROUS ROTATING ATOMIZER

Part 1. CALCULATION OF DROPLET TRAJECTORIES IN STILL AIR

This article contains results of numerical modeling the trajectories of droplets generated by the PRA in the still air. The dependence of range of scattering of drops on their volume considering evaporation of drops along a falling trajectory is received.

Keywords: porous rotary atomizer, trajectory of droplets, flight distance.

REFERENCES

1. Safiullin R.G., Protopopov V.A. O dispersnykh kharakteristikakh poristykh vrashchayushchikhsya raspyliteley na osnove abrasivnykh materialov [About the disperse characteristics of porous rotating atomizers on the basis of abrasive materials]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction], 2008, No. 5, pp.115–119 (rus.)
2. Nikolaev N.A., Posokhin V.N., Salimov N.B., Safiullin R.G. Dinamika formirovaniya kanel' pri filtratsii cherez poristoe telo [The dynamics of droplet formation in the filtration through the porous body]. Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 2004, Vol. 38, No. 4, pp. 441–445 (rus.)
3. Sklabinsky V.I. Opredelenie gidrodinamicheskikh kharakteristik dispersnoy fazy v malogabaritnykh vikhrevykh apparatakh [Determination of the hydrodynamic characteristics of the dispersed phase in small vortex devices]. Visnik KDPU im. Mikhailo Ostrogradskiy. 2009. Vip. 6 (59). Ch. 1, pp. 196–201 (rus.)
4. Holterman H.J. Kinetics and evaporation of water drops in air. Wageningen: IMAG (Report 2003-12). Wageningen UR, Institut voor Milieu en Agritechniek, 2003.
5. Williamson R.E., Threadgill E.D. A simulation for the dynamics of evaporating spray droplets in agricultural spraying. Transactions of the ASAE. 1974, No. 17, pp. 254–261.
6. List R.J. Smithsonian Meteorological Tables. 6th revised ed., 1st reprint. Smithsonian Miscellaneous Collections. City of Washington, USA, 1958, Vol. 114.

УДК 628.51.001

М.И. ШИЛЯЕВ, Е.М. ХРОМОВА, Ю.С. ГЛАДКОВА

СРАВНЕНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ОБЕЗВОЖИВАНИЕ УГОЛЬНОГО КОНЦЕНТРАТА В ЦЕНТРИФУГАХ, ВАКУУМ-ФИЛЬТРАХ И ФИЛЬТР-ПРЕССАХ*

Проведено сравнение удельных энергозатрат на обезвоживание угольного концентрата в центрифугах, вакуум-фильтрах и фильтр-прессах на основе теоретического анализа и по эксплуатационным и паспортным данным. Показаны хорошее согласие теории и фактических данных, а также энергетическое и эксплуатационное преимущества центрифугирования по сравнению с пневматическим обезвоживанием.

Ключевые слова: обезвоживание, угольный концентрат, центрифуги, вакуум-фильтр, фильтр-прессы, сравнение энергозатрат.

1. Постановка задачи. В работах [1, 2] получены теоретические зависимости для расчета предельной (остаточной концентрации) жидкости в угольном концентрате, обезвоживаемом в центрифугах, вакуум-фильтрах и фильтр-прессах, хорошо подтверждающиеся результатами испытаний и паспортными данными этих устройств. Однако в известных работах, например [3], учитывая весьма высокую энергоемкость обезвоживающего оборудования, при всей важности этой проблемы, вопросы сравнения энергозатрат на обезвоживание дисперсных материалов разными применяемыми для этих целей способами и средствами не рассматривались. Авторами на основе закономерностей, полученных в [1, 2], оказалось возможным это сделать с привлечением фактического материала по эксплуатации центрифуг, вакуум-фильтров и фильтр-прессов на обогатительных фабриках (ОФ) Кузбасского угольного бассейна.

2. Результаты расчетов. Оценим сначала удельный расход энергии на обезвоживание угольного концентрата в вакуум-фильтрах по факту, исходя из паспортных данных. Основной расход энергии в вакуум-фильтрах идет на преодоление гидравлического сопротивления фильтруемого зернистого слоя угольного концентрата (кека). Перепад давления на слое, как показано в [2], можно определить по формуле Эргана

$$\frac{\Delta P}{l} = 1{,}75\,\frac{1-\varepsilon_{ш}}{\varepsilon_{ш}^2}\rho_{в}\,\frac{u_{ф}^2}{d_a}, \qquad (1)$$

где l — толщина кека;
$\varepsilon_{ш}$ — порозность кека;
$\rho_{в}$ — плотность продуваемого, фильтруемого воздуха;
$u_{ф}$ — скорость фильтрации воздуха;
d_a — средний размер частиц угольного концентрата.

* Статья выполнена при финансовой поддержке в рамках соглашения № 14.583.21.0004 ФЦП, RFMEF158314X0004.

© Шиляев М.И., Хромова Е.М., Гладкова Ю.С., 2015

При этом расход энергии на преодоление гидравлического сопротивления ΔP, выраженного в Па, будет численно равен этому перепаду ΔP в Дж/м^3. Следовательно, полный расход энергии в единицу времени на преодоление сопротивления ΔP в вакуум-фильтре составит

$$W = \Delta PL, \text{ Дж/с}, \tag{2}$$

где L — объемный расход фильтруемого воздуха, м^3/с.

Расход L определяется как

$$L = u_ф S_ф \varepsilon_ш, \tag{3}$$

где $S_ф$ — площадь фильтрующей поверхности вакуум-фильтра.

Из уравнения (2) удельные затраты энергии в Дж/с·м^2 будут равны

$$w = \frac{W}{S_ф} = \Delta P u_ф \varepsilon_ш. \tag{4}$$

Для нашего случая из паспортных данных для вакуум-фильтра ОФ «Анжерская» [2, табл. 2, 3, рис. 3] зададим для расчета средним значением ΔP = 0,05 МПа из диапазона (0,04–0,06) МПа, $l = l_{max} \approx 30$ мм = 0,03 м (с фильтротканью и каркасом), d_a = 270 мкм в соответствии с [2, табл. 1], $\varepsilon_ш$ = 0,4 (для плотной упаковки зерен концентрата). Тогда из формулы (1) может быть вычислена скорость фильтрации $u_ф$:

$$u_ф = \sqrt{\frac{\Delta P}{l}\frac{\varepsilon_ш^3 d_a}{1,75(1-\varepsilon_ш)\rho_в}} = \sqrt{\frac{0,5\cdot 10^5}{0,03}\frac{(0,4)^3\cdot 0,27\cdot 10^{-3}}{1,75\cdot 0,6\cdot 0,6}} = 6,76 \text{ м/с}. \tag{5}$$

В (5) принято $\rho_в$ — 0,6 кг/м^3 в соответствии с уравнением состояния при температуре воздуха 20 °С и давлении 0,5·10^5 Па для вакуума в фильтре.

По формуле (4) получим

$$w = 0,5 \cdot 10^5 \cdot 6,76 \cdot 0,4 = 1,352 \cdot 10^5 \text{ Дж/с} \cdot \text{м}^2. \tag{6}$$

Следовательно, удельный расход энергии в вакуум-фильтре на обезвоживание угольного концентрата в Дж/кг·м^2 будет равен

$$w_{уд} = w/G = \frac{wm}{G_{уд}\, S_{ф.с}\, n} = 1,073\cdot 10^6, \tag{7}$$

где $G_{уд}$ — удельная производительность вакуум-фильтра по обезвоживаемому концентрату (0,32 т/ч·м^2 [2, табл. 2]);

$S_{ф.с}$ — поверхность фильтровального сектора ($S_{ф.с}$ = 1,12 м^2). Производительность фильтровального сектора:

$$G_{уд} S_{ф.с} = 0,32 \text{ т/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot 1,12 \text{ м}^2 = 0,352 \text{ т/ч}.$$

В (7) n — количество секторов на диске (n = 18);

m — количество дисков вакуум-фильтра (m = 14) [2, табл. 2].

Следовательно, производительность одного диска, через который осуществляется фильтрация, будет равна:

$$G_{уд} S_{ф.с} \frac{n}{m} = 0,126 \text{ кг/с}.$$

На каждый цикл обработки воздухом диска требуется 2–4 мин [2, рис. 3]. Следовательно, приблизительно в течение 1 ч пройдут все 18 секторов диска.

Примем производительность сравниваемой центрифуги 100 т/ч = 27,8 кг/с, мощность электродвигателя 25,3 кВт, площадь фильтрующей поверхности ротора 1,5 м^2 ([1, табл. 3]), тогда удельные затраты энергии на обезвоживание в центрифуге составят:

$$w = \frac{25300}{27{,}8 \cdot 1{,}5} = 607{,}2 \text{ Дж/кг·м}^2.$$

И, соответственно, отношение удельной энергии в центрифуге и удельной энергии в вакуум-фильтре по факту будет равно:

$$\overline{w} = \frac{607{,}2}{1{,}073 \cdot 10^5} = 0{,}566 \cdot 10^{-3} \cdot \qquad (8)$$

Как видно из полученного результата (8), энергетическое преимущество центрифуги в сравнении с вакуум-фильтром весьма значительное. При этом в центрифуге обезвоживание более глубокое (порядка 8 %), чем в вакуум-фильтре (порядка 30 %).

Полученный сопоставительный результат оценочный, но тем не менее теория хорошо его подтверждает. Покажем это.

Сделаем теоретическую оценку сравнительных удельных энергозатрат на обезвоживание угольного концентрата в центрифуге и в вакуум-фильтре на основании формул, полученных в [1, 2]. Так, работа сил давления по отрыву пленки жидкости с гранул концентрата в вакуум-фильтре равна:

$$A_{\Delta P} = \Delta P S_{\text{ф}} l = \Delta P V, \qquad (9)$$

где ΔP — перепад давления на фильтруемом слое концентрата толщиной l;
$S_{\text{ф}}$ — поверхность фильтрования;
$V = S_{\text{ф}} l$ — объем фильтруемого слоя концентрата.

Работа центробежных сил по отрыву пленки с гранул концентрата в центрифуге, в свою очередь, будет равна:

$$A_{F_{\text{ц}}} = F_{\text{ц}}(R_2 - R_1) = \rho_{\text{ж}} \omega^2 R_{\text{ср}} \varepsilon_{\text{ж}} V (R_2 - R_1), \qquad (10)$$

где $F_{\text{ц}}$ — центробежные силы, действующие на жидкость в слое концентрата;
ω — частота вращения ротора центрифуги ($\omega = \pi N/30$, $N = 420$ об/мин);
R_1 и R_2 — средний, наименьший и наибольший радиусы, между которыми заключен фильтруемый слой концентрата толщиной $R_2 - R_1$.

Естественно, для сравнительной оценки энергетики следует принять для обоих случаев объем фильтруемого слоя V одним и тем же, полагая массу обрабатываемого концентрата приблизительно одной и той же, тогда, в соответствии с (9) и (10),

$$\overline{w} = \frac{A_{F_{\text{ц}}}}{A_{\Delta P}} = \frac{\varepsilon_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} \omega^2 R_{\text{ср}} (R_2 - R_1)}{\Delta P}. \qquad (11)$$

Подставим в (11) ΔP по формуле (18) [2] для вакуум-фильтра, что обеспечивает предельную (остаточную) концентрацию жидкости в слое на частицах в виде пленки:

$$\Delta P = 160\left(\frac{\sigma\mu_{ж}^2 l^3}{k\rho_{ж}\,\varepsilon_{жф}^3}\right)^{1/2}\frac{1}{d_{аф}^3}\quad (k \approx 1). \tag{12}$$

Получим

$$\bar{w} = \frac{\varepsilon_{жц}\rho_{ж}\,\omega^2 R_{ср}(R_2 - R_1)}{160\left(\dfrac{\sigma\mu_{ж}^2 l^3}{\rho_{ж}\,\varepsilon_{жф}^3}\right)^{1/2}\dfrac{1}{d_{аф}^3}}\ ,\ \varepsilon_{жц} = 12\frac{\sigma(1-\varepsilon_{ш})}{\rho_{ж}\,\omega^2 R_{ср}\,d_{ац}^2}\ [1], \tag{13}$$

где $\varepsilon_{жц}$ — предельная концентрация жидкости при центрифугировании; $\varepsilon_{жф}$ — предельная концентрация жидкости при вакуум-фильтровании; $d_{ац}$, $d_{аф}$ — средние диаметры угольных частиц в опытах при центрифугировании и при вакуум-фильтровании соответственно.

Для расчета $\bar{w}$ примем σ = 0,072 Н/м, $R_2 - R_1 = l$ = 0,03 м, $\varepsilon_{жф}$ = 0,3, $\rho_ж = 10^3$ кг/м^3, $\mu_ж = 10^{-3}$, $\varepsilon_ш$ = 0,4 (плотная упаковка зерен), $d_{аф}$ = 270 мкм = = 0,27 · 10^{-3} м, $d_{ац}$ = 2,55 · 10^{-3} м, где σ, $\mu_ж$, $\rho_ж$ — коэффициенты поверхностного натяжения, динамическая вязкость и плотность воды. Подставляя вышеприведенные параметры в (13), будем иметь

$$\bar{w} \approx 1{,}0 \cdot 10^{-3}. \tag{14}$$

Выводы. Полученный теоретический результат (14) неплохо согласуется с фактическим (8), несмотря на грубость приближений при проведении оценок.

Что касается удельных энергозатрат в фильтр-прессах, то они будут значительнее превосходить энергозатраты в центрифугах, поскольку используемые в фильтр-прессах перепады давления на порядок выше, чем в вакуум-фильтрах.

Заметим, что из паспортных данных для центрифуг при расчетах принята максимальная производительность по готовому обезвоженному угольному концентрату — 100 т/ч. Но если даже производительность ее будет 1 т/ч, все равно энергозатраты на обезвоживание с ее помощью будут на порядок меньше, чем при использовании вакуум-фильтра.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шиляев М.И., Горбунков А.И., Богомолов А.Р., Хромова Е.М. Расчет предельной влажности угольного концентрата при его обезвоживании в центрифугах // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 9–10. С. 71–76.
2. Шиляев М.И., Горбунков А.И., Богомолов А.Р., Хромова Е.М. Обезвоживание угольной суспензии в вакуум-фильтрах и фильтр-прессах // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 11. С. 39–48.
3. Каминский В.С. и др. Интенсификация процессов обезвоживания М.: Недра, 1982. 224 с.

***Шиляев Михаил Иванович**, д-р техн. наук, проф.*
Томский государственный архитектурно-строительный университет
***Хромова Елена Михайловна**, канд. физ.-мат. наук, доц.*
Томский государственный архитектурно-строительный университет

***Гладкова Юлия Сергеевна**, студ.*
Томский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 28.08.15

Shilyaev Mikhail Ivanovich, DSc, professor, Tomsk State University of Architecture and Building, Russia
Khromova Elena Mikhaylovna, PhD, assistant professor, Tomsk State University of Architecture and Building, Russia
Gladkova Yuliya Sergeevna, student, Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

COMPARISON OF ENERGY CONSUMPTION FOR DEWATERING OF COAL CONCENTRATES IN CENTRIFUGES, VACUUM-FILTERS AND FILTER-PRESS

A comparison of the specific energy consumption for dewatering of coal concentrate in centrifuges, vacuum-filters and filter-presses, based on theoretical analysis and operational and passport data has been held. The good agreement is shown between theory and actual data, as well as energy and operational benefits compared to centrifugal air dehydration.

Keywords: dehydration, coal concentrate, centrifuges, vacuum-filters, filter-presses, comparison of energy consumption.

REFERENCES

1. Shilyaev M.I., Gorbunkov A.I., Bogomolov A.R., Khromova E.M. Raschet predel'noy vlazhnosti ugol'nogo kontsentrata pri ego obezvozhivanii v tsenrifugakh [Calculation of moisture limit of coal concentrates when dewatering in centrifuges]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2014, No. 9–10, pp. 71–76 (rus.)
2. Shilyaev M.I., Gorbunkov A.I., Bogomolov A.R., Khromova E.M. Obezvozhivanie ugol'noy suspenzii v vakuum-fil'trakh i fil'tr-pressakh [Dehydration of coal slurry in vacuum-filters and filter-presses]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2014, No. 11, pp. 39–48 (rus.)
3. Kaminsky V.S. et al. Intensifikatsiya protsessov obezvozhivaniya [Intensification of dehydration processes]. M., Nedra, 1982, 224 p. (rus.)

НАУЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

УНИКАЛЬНЫЙ ОПЫТ ОАО «ГАЗПРОМ» ПО УПРАВЛЕНИЮ СЛОЖНЕЙШИМИ КРУПНОМАСШТАБНЫМИ ИНВЕСТИЦИОННЫМИ ПРОЕКТАМИ*

Общепризнана потребность во всеобъемлющем описании теории и практики управления инвестиционными проектами с учетом мирового опыта крупных корпораций, осуществляющих реализацию крупномасштабных, высокотехнологичных проектов и программ, а также требований международных стандартов на основе системных подходов к определению их объективной стоимости и социально-экономической эффективности с привлечением иностранных инвестиций. Введение рациональных цен в строительстве, оптимизация на их базе уровня капитальных вложений критически важны в естественных монополиях России, являющихся крупными инвесторами и застройщиками, в частности, для нефтегазового сектора экономики. Остро названные проблемы встают при реализации крупномасштабных высокотехнологичных инвестиционных проектов в труднодоступных и малонаселенных регионах, особенно на полуострове Ямал, в Западной и Восточной Сибири, на Дальнем Востоке, полуострове Камчатка и острове Сахалин, где длительное время остро ощущается недостаток рабочей силы, доминируют сложные природно-климатические и другие условия осуществления строительства.

Первое издание книги — результат уникальной пятнадцатилетней деятельности авторского коллектива (В.С. Резниченко, А.Г. Ананенков, Л.С. Чугунов, Н.Н. Ленинцев, А.И. Ким, В.В. Павлов), возглавляемого вице-президентом Российской инженерной академии, советником Российской академии архитектуры и строительных наук В.С. Резниченко — явилось крепким фундаментом для удовлетворения именно этой потребности. Широкое признание и использование первого издания справочного пособия в практике управления инвестиционной деятельностью многих корпораций служит доказательством того, что оно выполнило свою задачу.

Второе издание книги представляет предложения, во-первых, по совершенствованию российского законодательства в области управления инвестиционными процессами и, во-вторых, по приведению практики инвестиционно-строительной деятельности в соответствие с действующими руководящими документами.

В частности, рассмотрены следующие новые аспекты системы управления инвестиционными процессами корпорации и ее дочерних обществ: более глубоко раскрыт системный подход по декомпозиции; впервые рассмотрены методология и практика совершенствования организационных структур, направленные на повышение эффективности их инвестиционной деятельности; разработана методология создания эффективных информационных систем для совершенствования управления инвестиционной деятельностью в труднодоступных регионах

* Рецензия на книгу: Ананенков А.Г., Резниченко В.С., Чугунов Л.С., Ленинцев Н.Н. Система управления разработкой и реализацией инвестиционных проектов и программ в корпорации и ее дочерних обществах: справ. пособие для специалистов. 2-е изд., доп. и перераб. / под общ. ред. профессоров А.Г. Ананенкова и В.С. Резниченко. М.: Спутник+, 2015. 518 с.

© Владимиров С.А., 2015

РФ со сложными природно-климатическими условиями, особенно при реализации инвестиционных проектов нефтегазовой промышленности; достигнута бóльшая сходимость проектно-сметной информации с планово-договорной, что соответствует передовому мировому опыту и позволяет сделать эффективный шаг вперед в отечественной практике, где сметные и плановые показатели зачастую существенно отличаются, особенно на предварительных стадиях проектирования и годового (двух, трехлетнего) планирования инвестиционной деятельности корпорации.

Отдельный материал посвящен особенностям ценообразования по крупномасштабным и территориально удаленным стройкам, включая актуальные вопросы проектирования, ценообразования, строительства, регистрации, эксплуатации, налогообложения и учета временных зданий и сооружений, на примере нефтегазового строительства, в особенности при сооружении магистральных трубопроводов и обустройстве нефтегазоконденсатных месторождений.

Новые подходы, изложенные в пособии, проиллюстрированы на материалах реальных инвестиционных проектов, что выгодно отличает его от книг, в которых представлена только теория и методология разработки и принятия инвестиционных и других управленческих решений.

Авторы выражают большую признательность руководству и специалистам ОАО «Газпром» и его дочерних обществ, руководителям крупных научных школ профессорам А.А. Гусакову, В.М. Васильеву, Л.С. Андрееву, авторитетным в мире ученых и практиков профессорам Ю.П. Баталину, С.Н. Булгакову, П.Г. Грабовому, В.М. Серову за результаты совместной работы, которые учтены при подготовке книги.

В заключение можно порекомендовать авторам следующие направления работы:

— при заключении подрядных договоров и установлении договорных цен учитывать подсистемы корпоративного лимитирования отдельных видов затрат как основу для оптимизации планов капитальных вложений;

— проблемы снижения стоимости крупномасштабного строительства решать в основном за счет повышения эффективности конкурсного отбора инвесторов, подрядчиков и поставщиков ресурсов и оборудования.

Некоторые предложения по определению содержания предложенной авторами инновационной системы управления инвестиционно-строительными проектами и программами на всех стадиях инвестиционного процесса являются дискуссионными и требуют проведения дальнейших исследований.

Высказанные замечания и пожелания не снижают достоинств рецензируемой книги. В целом она представляет собой уникальный вклад в решение научных и практических проблем ценообразования и управления стоимостью строительства для современной России, а также повышения эффективности планирования капитального строительства и управления инвестиционными проектами.

Пособие будет полезно работникам органов государственного управления, научных, проектных, строительных, снабженческих и других организаций, занятых в сфере инвестиционно-строительной деятельности, а также профессорско-преподавательскому составу вузов, аспирантам и студентам.

С.А. ВЛАДИМИРОВ, *доктор экономических наук, профессор Северо-Западного института управления Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, г. Санкт-Петербург*

УСТРОЙСТВО ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОНА НА БАЗЕ ПЕРСОНАЛЬНОГО КОМПЬЮТЕРА

В НГАСУ (Сибстрин) разработано устройство для автоматического управления тепловой обработки бетона с обеспечением энергосбережения до 50 % за счет полезного использования тепловой инерции бетона и учета суточной динамики температуры воздуха, скорости и направления ветра, а также позволяющее гарантировано выполнять все температурные ограничения нормативных документов. Устройство состоит из цифрового автоматического регулятора мощности (ЦАРМ) и персонального компьютера. Персональный компьютер служит для введения в ЦАРМ необходимой информации для конкретной бетонируемой монолитной конструкции: максимально и минимально допустимые значения температуры бетона, максимально допустимые значения скорости перестройки температурного поля после включения и выключения нагревателей, значение критической прочности бетона. В ЦАРМ заранее вводится программное обеспечение, позволяющее по показаниям температурных датчиков с заданной временной дискретностью рассчитывать средневзвешенную по объему конструкции температуру бетона. При достижении бетоном максимально допустимой температуры, ЦАРМ нагреватели выключаются, а при достижении минимально заданной температуры — включаются. Нарастание прочности бетоном рассчитывается с помощью ЦАРМ с использованием компьютерной аппроксимации высоко достоверных монограмм ЦНИИОМТП Госстроя России.

Главные преимущества предложения:

- **обеспечение энергосбережения до 50 %;**
- **исключение человеческого фактора;**
- **выполнение нормативных температурных ограничений;**
- **обеспечение требуемого качества бетона конструкций;**
- **фиксирование (с выключением нагревателей) момента набора бетоном критической прочности.**

Университет предлагает сотрудничество всем заинтересованным в применении устройства.

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, НГАСУ (Сибстрин)
E-mail:ntio@sibstrin.ru
Internet:www.sibstrin.ru/innovation
Тел./факс: (383) 266-25-27

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ, ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И РЕДАКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ РУКОПИСЕЙ СТАТЕЙ

1. Рукопись представляется в редакцию *на русском языке.* Зарубежные авторы могут присылать 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;

— *разрешение* Роспатента на открытую публикацию материалов по заявке на изобретение.

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 Cyr размером 14 пт с межстрочным интервалом 1,5, все поля — 20 мм. Обязательна нумерация страниц внизу посредине. 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/

а) 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;
- формулы 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 п, *I* и *J* и т.п. пояснения выполняются простым карандашом на полях;
- иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в Corel Draw или Microsoft Word, записанных с разрешением 300 dpi, 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;
- таблицы печатаются каждая на отдельном листе, все наименования в них даются полностью, без сокращения слов;
- библиографический список (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_bibilograficheskogo_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;

— сведения об авторах: последовательно для каждого — фамилия, имя, отчество (полностью), ученая 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 названии организации), страны;

— название статьи;
— аннотация;
— ключевые слова (Keywords);
} перевод, идентичный русскому варианту;

— 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., p. и pp., в конце — (rus.).

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 присылать 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 высылаются.

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 2-е полугодие 2015 г.

каталожная цена за 6 месяцев — 3300 р.

цена отдельного номера — 550 р.

ISSN 0536–1052. Известия вузов. Строительство. 2015. № 9 (681). 1–126

ББК 38
И 33
УДК 69

Научное издание

Известия вузов

СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 9 (681) 2015

Научно-теоретический журнал

Редакторы *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*
Технический редактор *Н.М. Макаренко*
Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*
Корректор *Г.И. Шведкина*