

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РФ
МЕЖДУНАРОДНАЯ ОБЩЕСТВЕННАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ СОДЕЙСТВИЯ РАЗВИТИЮ
СТРОИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ**

СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 5 (701)
Май 2017 г.

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

Редакционная коллегия

В.Н. Азаров, д-р техн. наук, проф., ВИАС, ВГТУ, Волгоград
А.А. Афанасьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИУ МГСУ, Москва
А.А. Волков, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИУ МГСУ, Москва
В.А. Воробьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., МАДГТУ (МАДИ), Москва
В.Г. Гагарин, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИИСФ, Москва
М.А.о. Гаджиев, д-р техн. наук, проф., АУАС, Баку, Азербайджан
У. Гайсбауэр, д-р – инж., Институт аэрогазодинамики, Университет Штутгарта, Германия
Гё Ун Чой, PhD, проф., Национальный университет г. Инчхон, Республика Корея
В.В. Дегтярев, д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
Й. Деспотович, PhD, проф., Университет Белграда, Сербия
В.Т. Ерофеев, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИ МордГУ им. Н.П. Огарева, Саранск
Г.В. Есаулов, акад. РААСН, д-р архитектуры, проф., МАРХИ, Москва
В.И. Жаданов, д-р техн. наук, проф., ОГУ, Оренбург
М. Иветич, PhD, проф., Университет Белграда, Сербия
В.А. Игнатьев, д-р техн. наук, проф., ВИАС, ВГТУ, Волгоград
В.И. Колчунов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., Юго-ЗапГУ, Курск
В.И. Костин, д-р техн. наук, проф. (*заместитель главного редактора*), НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
Г.Б. Лебедев, канд. техн. наук, доц. (*заместитель главного редактора*), НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
П. Либланг, д-р, проф., Высшая техническая школа, Университет прикладных наук, Кёльн, Германия
Л.С. Ляхович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ТГАСУ, Томск
В.М. Митасов, д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
В.И. Морозов, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург
Ж.С. Нугужинов, д-р техн. наук, проф., Казахстанский МИРП, КГТУ, Караганда, Казахстан
Ю.П. Панибратов, акад. РААСН, д-р экон. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург
Ю.П. Правдивец, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИУ МГСУ, Москва
Г.И. Пустоветов, чл.-кор. РААСН, д-р архитектуры, проф., НГУАДИ, Новосибирск
В.Г. Себешев, почет. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф. (*главный редактор*), НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
Ю.Л. Сколупович, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
Ю.А. Феофанов, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург
Е.М. Чернышов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ВГАСУ, Воронеж

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

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

- Гербер Ю.А., Себешев В.Г.** Особенности расчета надежности динамически нагруженных систем с учетом эффекта нелинейности амплитудно-частотных характеристик в резонансных зонах 5
- Самошкин А.С., Тихомиров В.М.** Исследование нелинейного деформирования железобетона экспериментально-расчетными методами 17

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

- Бердов Г.И., Бернацкий А.Ф., Плетнев П.М., Хританков В.Ф., Виноградов С.А., Семикин П.В.** Исследование взаимодействия портландцемента с водой методом высокочастотной диэлькометрии 28
- Селяев В.П., Куприяшкина Л.И., Киселев Н.Н., Селяев П.В.** Оптимизация состава наполнителя вакуумной теплоизоляционной панели на основе пирогенного микрокремнезема 36
- Логанина В.И., Кислицына С.Н., Фролов М.В.** Активность высокопористых наполнителей для теплоизоляционных сухих строительных смесей 43
- Гныря А.И., Абзаев Ю.Аю, Коробков С.В., Мокшин Д.И., Гаусс К.С., Бояринцев А.П.** Влияние длительности низкотемпературного твердения на структуру цементного камня 49

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

- Файзиев Х.** Экспериментальные исследования уплотняемости дигидратного фосфогипса для строительства дамб гидроотвала 59

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

- Дегтярев В.В., Орлова Е.О., Яненко А.П.** О некоторых аспектах обеспечения безопасности при пропуске судов через судопропускные сооружения 65

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

- Самарин О.Д.** О целесообразности применения свободного охлаждения в системах кондиционирования воздуха в холодный период года 71

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

- Молодин А.В.** Планировка и застройка крупнейших поселений Русской Америки первой половины XIX века. Часть 2 78
- Герасимов А.П.** Западноевропейский модерн и неоромантические тенденции в деревянной архитектуре сибирских городов 93

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

- Назиров Р.А., Лямзина П.В.** Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности сибирской сосны 103

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE
OF RUSSIAN FEDERATION

INTERNATIONAL PUBLIC ORGANIZATION
“ASSOCIATION OF EDUCATIONAL
CIVIL ENGINEERING INSTITUTIONS”

NEWS OF HIGHER EDUCATIONAL
INSTITUTIONS

CONSTRUCTION

No. 5 (701)

May 2017

Scientific-theoretical journal
Published since March 1958
Monthly

Editorial Board

V.N. Azarov, DSc (Eng), Prof., Volgograd
A.A. Afanas'yev, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow
A.A. Volkov, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow
V.A. Vorob'yov, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow
V.G. Gagarin, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow
M.A.o. Hajiyev, DSc (Eng), Prof., Baku, Azerbaijan
U. Gaisbauer, Dr. – Ing., Institut für Aerodynamik und Gasdynamik, Universität, Stuttgart, Germany
Jin Tak Choi, PhD, Prof., Incheon National University, Korea
V.V. Degtyarev, DSc (Eng), Prof., Novosibirsk
J. Despotović, PhD, Prof., University of Belgrad, Serbia
V.T. Erofeev, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Saransk
G.V. Esaulov, Acad. RAACS, DSc (Architecture), Prof., Moscow
V.I. Zhadanov, DSc (Eng), Prof., Orenburg
M. Ivetić, PhD, Prof., University of Belgrad, Serbia
V.A. Ignat'yev, DSc (Eng), Prof., Volgograd
V.I. Kolchunov, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Kursk
V.I. Kostin, DSc (Eng), Prof. (*Deputy Edinor-in-Chief*), Novosibirsk
G.B. Lebedev, PhD., Ass. Prof. (*Deputy Edinor-in-Chief*), Novosibirsk
P. Lieblang, Dr., Prof., Technische Hochschule, Köln, Germany
L.S. Lyakhovich, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Tomsk
V.M. Mitasov, DSc (Eng), Prof., Novosibirsk
V.I. Morozov, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Saint-Petersburg
Zh. S. Nuguzhinov, DSc (Eng), Prof., Karaganda, Kazakhstan
Yu.P. Panibratov, Acad. RAACS, DSc (Econ), Prof., Saint-Petersburg
Yu.P. Pravdivets, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow
G.I. Pustovetov, Corr. Mem. RAACS, DSc (Architecture), Prof., Novosibirsk
V.G. Sebeshev, Hon. Mem. RAACS, PhD., Prof. (*Edinor-in-Chief*), Novosibirsk
Yu.L. Skolubovich, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Novosibirsk
Yu.A. Feofanov, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Saint-Petersburg
Ye.M. Chernyshov, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Voronezh

Responsible secretary N.V. Bitkina

The editorial office's address:

113 Leningradskaya St. Novosibirsk 630008

Phone number/fax +7 (383) 266 28 59

www.sibstrin.ru E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

CONTENTS

THE THEORY OF ENGINEERING STRUCTURES

- Gerber Yu.A., Sebeshev V.G.** Peculiarities of reliability analysis of dynamically loaded systems with taking into account the non-linearity effects of the frequency-response curves in the resonance zones 5
- Samoshkin A.S., Tikhomirov V.M.** Study of nonlinear deformation of reinforced concrete by experimental-calculated methods 17

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

- Berdov G.I., Bernatskiy A.F., Pletnev P.M., Khritankov V.F., Vinogradov S.A., Semikin P.V.** Investigation of portland cement with water using the method of high-frequency dielectric measurement 28
- Selyaev V.P., Kupriyashkina L.I., Kiselev N.N., Selyaev P.V.** Optimization of the composition of the filler of a vacuum insulation panel based on pyrogenic mikrosilicheskiy 36
- Loganina V.I., Kislitsyna S.N., Frolov M.V.** Activity of highly perfect fillers for thermal insulating dry building mixtures 43
- Gnyrya A.I., Abzaev Yu.A., Korobkov S.V., Mokshin D.I., Gauss K.S., Boyarintsev A.P.** Influence of the ling-temperature solidity duration on structure of cement stone 49

ECONOMICS AND MANAGEMENT OF CONSTRUCTION.

AUTOMATION AND CONSTRUCTION TECHNOLOGY

- Fayziev H.** Experimental investigations of the digidrate phosphogyps complex for the construction of the damb hydrototal 59

HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

- Degtyarev V.V., Orlova E.O., Yanenko A.P.** About some aspects ensuring of security in process of ships movement through navigable locks 65

SANITARY ENGINEERING

- Samarin O.D.** On the expediency of using free cooling in air conditioning systems during the cold period of a year 71

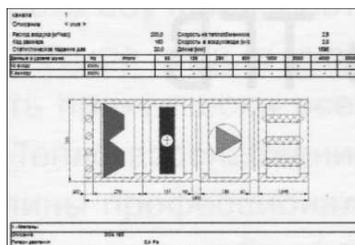
SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND ECOLOGY

- Molodin A.V.** Town planning of biggest settlement of Russian America in first part of XIX century. Part 2 78
- Gerasimov A.P.** Western european modern and neo-romantic trends in the wooden architectur of siberian cities 93

SCIENTIFIC AND METHODOICAL SECTION

- Nazirov R.A., Lyamzina P.V.** Experimental determination of thermal conductivity coefficient of siberian pine 103

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ



УДК 624.04:519.2

Ю.А. ГЕРБЕР, В.Г. СЕБЕШЕВ

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ДИНАМИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА НЕЛИНЕЙНОСТИ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В РЕЗОНАНСНЫХ ЗОНАХ

Рассмотрены вопросы, имеющие значение для совершенствования и уточнения расчетов надежности гармонически нагруженных систем при частотах воздействий, близких к резонансным. Исследованы особенности вероятностных свойств коэффициента динамичности как наиболее информативной характеристики напряженно-деформированного состояния системы, обусловленные большими градиентами амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в областях собственных частот. Аналитически и приближенными методами получены описания плотности распределения динамического коэффициента с учетом и без учета демпфирования, выявлены характерные особенности функций распределения. Представлены качественные и количественные результаты вычисления вероятности отказа по расчетному критерию безотказности с использованием точного и приближенных решений. Оценены погрешности, возникающие от использования приближенных методов вероятностного расчета, обоснована необходимость и обозначены возможности применения предложенных уточненных методик в расчетах надежности динамически деформируемых систем в резонансных частотных областях, что актуально, в частности, для конструкций с гасителями колебаний.

К л ю ч е в ы е с л о в а: надежность, вероятность отказа, система с конечным числом степеней свободы масс, гармоническая нагрузка, резонанс, динамический коэффициент, сильные нелинейности АЧХ, плотность распределения.

Особенностью динамически нагруженных систем с конечным числом степеней свободы масс при установившихся вынужденных колебаниях является наличие больших градиентов амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) их напряженно-деформированного состояния (НДС) в области собственной (резонансной) частоты, близкой к частоте гармонического воздействия. Из-за стохастической природы всех расчетных параметров системы и динамической нагрузки возможны случайные отклонения их фактических значений от проектных величин, что может привести к попаданию реализации рабочей частоты нагрузки в область некоторой резонансной частоты

системы и, как следствие, – к ухудшению ее динамического состояния. В расчетах надежности таких систем использование практически удобного метода статистической линеаризации (МСЛ) [1] для определения вероятностных свойств параметров, характеризующих динамическое состояние системы в резонансных зонах, может давать большие погрешности ввиду особенностей плотностей их распределения из-за сильной нелинейности АЧХ. Некоторые из этих особенностей отмечались в работах В.В. Болотина [2], Б.Г. Коренева, Л.М. Резникова [3] и др. Поэтому для корректного расчета надежности необходимо использовать уточненные функции плотностей распределения расчетных параметров.

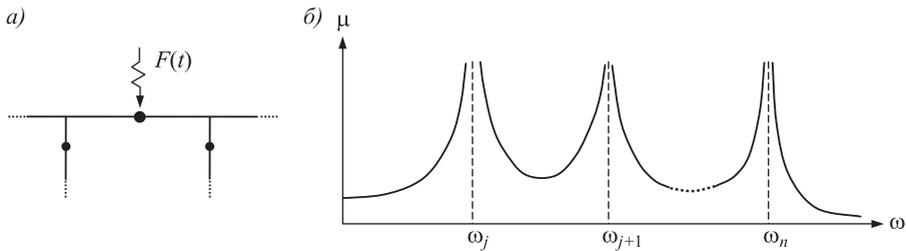


Рис. 1. Обобщенная схема динамической системы (а) и график АЧХ (б)

В оценках динамического напряженно-деформированного состояния систем с конечным числом степеней свободы масс (рис. 1, а) и вычисления их надежности может быть целесообразным использование коэффициентов динамичности μ (рис. 2, б). В случае, когда система имеет одну степень свободы (рис. 2, а), выражение для динамического коэффициента (ДК) при установившихся вынужденных колебаниях от гармонической нагрузки без учета демпфирования имеет следующий вид:

$$\mu = \frac{1}{|1 - k_{\omega}^2|}, \quad (1)$$

где $k_{\omega} = \omega_F / \omega_0$; ω_F – рабочая частота нагрузки; ω_0 – собственная частота системы.

Отметим, что к модели по рис. 2, а можно привести любую систему с конечным числом степеней свободы масс, используя различные методы

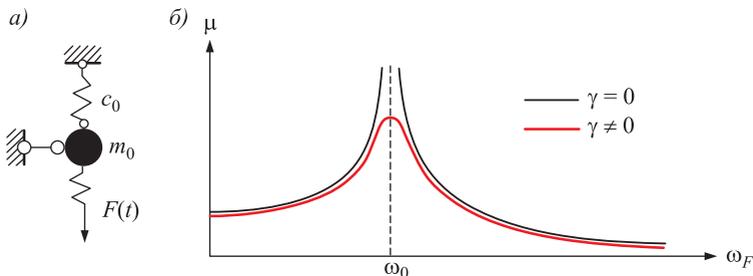


Рис. 2. Расчетная модель динамической системы (а) и график АЧХ для системы с одной степенью свободы (б)

и приемы [4–6], с соответствующим вычислением обобщенных массы m_0 и жесткости c_0 .

С учетом демпфирования выражение для динамического коэффициента принимает вид [4]

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega_F / \omega_0)^2]^2 + \gamma^2 (\omega_F / \omega_0)^2}}$$

или

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{(1 - k_\omega^2)^2 + (\gamma k_\omega)^2}}, \quad (2)$$

где γ – коэффициент демпфирования (неупругого сопротивления).

Вероятностные свойства коэффициента k_ω зависят от статистических характеристик случайных частот ω_F и ω_0 (внешнего воздействия и собственных колебаний системы), которые, как и γ , в свою очередь, связаны с обладающими стохастическими свойствами расчетными параметрами динамической системы x_i ($i = 1, \dots, n$). Следовательно, ДК также является случайной величиной (СВ): $\mu = \mu(x_1, \dots, x_n)$. При определении плотности распределения ДК как СВ по модели (1) μ будет функцией одного случайного аргумента: $\mu = \mu(k_\omega)$, где $k_\omega = k_\omega(x_1, \dots, x_n)$.

Используя известную зависимость [1], получаем

$$p_\mu(\mu) = p_{k_\omega}(k_\omega(\mu)) \frac{dk_\omega(\mu)}{d\mu}. \quad (3)$$

Из (1) находим

$$k_{\omega 1,2}(\mu) = \sqrt{1 \mp 1/\mu} \quad (4)$$

и далее

$$\frac{dk_\omega}{d\mu} = \frac{\pm 1}{2\mu^2 \sqrt{1 \mp 1/\mu}}. \quad (5)$$

Формулы (4) и (5) справедливы при $\mu \geq 1$. Если $\mu < 1$, то имеется единственное решение – с нижними знаками в (4) и (5).

Принято считать, что частоты ω_F и ω_0 как случайные величины характеризуются нормальным распределением (что согласуется с их смыслом), вследствие чего и плотность распределения k_ω тоже будет близка к нормальной. С учетом особенностей распределения Гаусса и возможных отклонений параметров в дальнейшем используется усеченное по доверительному интервалу распределение k_ω (рис. 3) в следующем виде:

$$p_{k_\omega}(k_\omega) = k_r \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi} A_{k_\omega} \bar{k}_\omega} \exp \left[-\frac{(k_\omega / \bar{k}_\omega - 1)^2}{2A_{k_\omega}^2} \right] - a \right\}, \quad (6)$$

где $k_r = \frac{1}{1 - 2(w + t_p A_{k_\omega} \bar{k}_\omega a)}$ – коэффициент, учитывающий пренебрежимо

малую вероятность реализации значений k_ω за пределами доверительного интервала $k_\omega^{п,п} = \bar{k}_\omega \pm t_p \hat{k}_\omega$ (\bar{k}_ω – математическое ожидание k_ω);

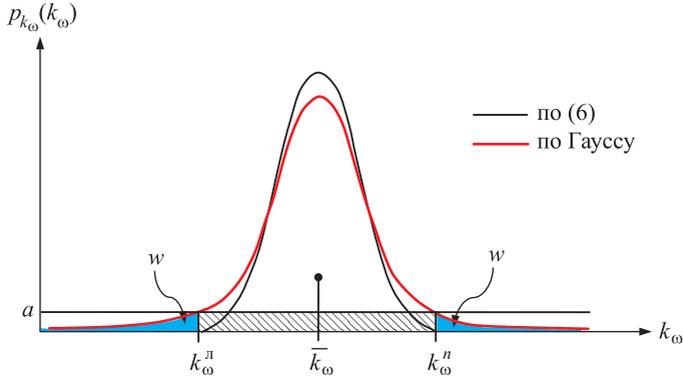


Рис. 3. Редуцированная плотность распределения $p_{k_{\omega}}(k_{\omega})$

t_P – квантиль, соответствующий доверительной вероятности P ;

$w = \int_{-\infty}^{k_{\omega}^II} p_{k_{\omega}}(k_{\omega}) dk_{\omega}$ – вероятность попадания k_{ω} в интервал $[-\infty; k_{\omega}^II]$;

a – значение плотности вероятности, соответствующее границам доверительного интервала;

$A_{k_{\omega}} = \sqrt{A_{\omega F}^2 + A_{\omega 0}^2}$ – коэффициент вариации k_{ω} ; $A_{\omega F}$, $A_{\omega 0}$ – коэффициенты вариации частот ω_F и ω_0 .

Графики $p_{\mu}(\mu)$, построенные по (3) с использованием выражений (4)–(6) при варьировании математического ожидания (МО) \bar{k}_{ω} и фиксированных значений коэффициентов вариации ($A_{\omega 0} = 0,01$; $A_{\omega F} = 0,01$), приведены на рис. 4. Кривые $p_{\mu}(\mu)$ обладают явной асимметрией, и по мере приближения к резонансной частоте их вид качественно меняется, следовательно, они не могут быть описаны нормальным распределением. Поэтому определение вероятностных характеристик ДК (МО и дисперсии) по МСЛ в традиционном предположении о нормальном характере распределения $p_{\mu}(\mu)$ может давать погрешности, причем особенно значительные именно в зоне резонанса.

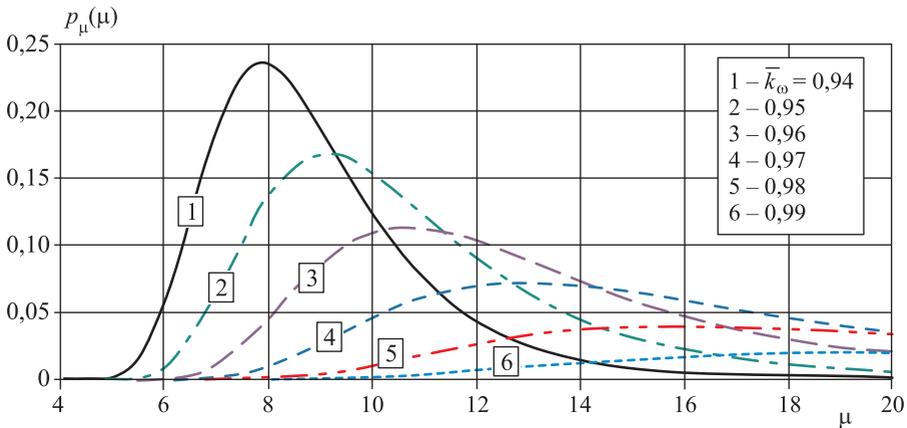


Рис. 4. Графики плотности распределения динамического коэффициента $p_{\mu}(\mu)$ без учета демпфирования

Полученные по (3) аналитические выражения плотности ДК позволяют находить точные значения основных вероятностных характеристик коэффициента динамичности – МО и дисперсии (либо стандарта)

$$\bar{\mu} = \int_{-\infty}^{+\infty} \mu p_{\mu}(\mu) d\mu; \quad \hat{\mu} = \int_{-\infty}^{+\infty} (\mu - \bar{\mu})^2 p_{\mu}(\mu) d\mu. \quad (7)$$

Для их приближенного вычисления можно использовать метод статистической линейаризации или метод статистических испытаний (МСИ).

По МСЛ:

$$\bar{\mu} = \frac{1}{|1 - \bar{k}_{\omega}^2|} - \text{по (1)}; \quad \hat{\mu} = \sum_{i=1}^n \left(\left. \frac{\partial \mu}{\partial x_i} \right|_{x=\bar{x}} \hat{x}_i \right)^2, \quad (8)$$

где x_i ($i = 1, \dots, n$) – случайные расчетные параметры системы;

$\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_n$ – их стандарты.

МСИ основан на выполнении многократных компьютерных перерасчетов μ по (1) при значениях аргументов, генерируемых датчиками случайных чисел.

На рис. 5 представлены графики изменения вероятностных характеристик ДК (МО и стандарта) в зависимости от \bar{k}_{ω} , вычисленные по МСЛ

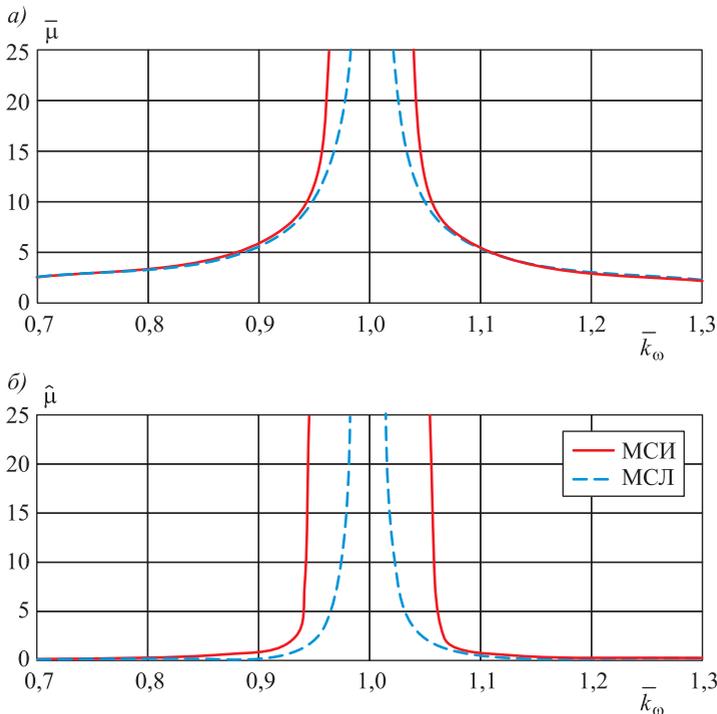


Рис. 5. Графики вероятностных характеристик динамического коэффициента без учета демпфирования
а – математическое ожидание; б – стандарт

и МСИ. Видно, что полученные кривые имеют существенные отличия в области резонансной частоты, причем значения, полученные по МСЛ, значительно меньше.

При учете демпфирования (выражение ДК – по (2)) для определения плотности распределения случайной величины μ используем уравнение (3), из которого

$$k_{\omega 1,2} = \sqrt{1 - \frac{\gamma^2}{2} \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{4}{\gamma^2} \left(1 - \frac{1}{(\gamma\mu)^2} \right)} \right]}, \quad (9)$$

далее, при детерминированном коэффициенте демпфирования γ

$$\frac{dk_{\omega}}{d\mu} = \frac{\pm 1}{\gamma^2 \mu^3 \sqrt{\left\{ \frac{4}{\gamma^2} \left(\frac{1}{(\gamma\mu)^2} - 1 \right) + 1 \right\} \left\{ 1 \mp \frac{\gamma^2}{2} \left[\sqrt{\frac{4}{\gamma^2} \left(\frac{1}{(\gamma\mu)^2} - 1 \right) + 1} + 1 \right] \right\}}}. \quad (10)$$

Согласно (9), при $\mu > 1$ существуют два действительных значения $k_{\omega 1}$ и $k_{\omega 2}$ (рис. 6, а), при этом производная (10) положительна на участке $0 < k_{\omega} < k_{\omega 0}$ и отрицательна при $k_{\omega} > k_{\omega 0}$.

На рис. 6, б приведены графики плотности распределения $p_{\mu}(\mu)$ при разных значениях k_{ω} и заданных $A_{\omega 0} = 0,01$; $A_{\omega F} = 0,01$; $\gamma = 0,1$, вычисленные аналитически и по МСИ – полученные распределения $p_{\mu}(\mu)$ практически полностью совпадают. Следовательно, результаты, которые дает применение МСИ, можно считать достоверными – это позволяет использовать МСИ в расчетах, где аналитические выражения ДК и других параметров НДС получить затруднительно или невозможно. На рис. 6, в представлены кривые плотности распределения ДК в зависимости от значений k_{ω} – они существенно отличны от нормального закона. Кроме того, наблюдается принципиальная разница по сравнению с плотностями распределения ДК без учета демпфирования (см. рис. 4) – наличие у правого края интервала μ восходящих ветвей [2], градиент которых нарастает по мере приближения k_{ω} к $k_{\omega 0}$ (резонансной точке [7]). Рис. 6, г показывает трансформации кривых плотности распределения ДК с учетом демпфирования при разных значениях k_{ω} .

На рис. 7 представлены графики изменения вероятностных характеристик (МО и стандарта) динамического коэффициента в зависимости от k_{ω} в области сильной нелинейности АЧХ, полученные разными методами расчета.

Графики свидетельствуют о том, что погрешности вычисления МО ДК приближенным МСЛ невелики – лишь в интервале $k_{\omega} \in [0,99; 1]$ превышают 3 % (рис. 7, а), в то время как точные и приближенные (по МСЛ) значения стандарта ДК отличаются столь существенно (в разы – см. таблицу), что это может привести к недопустимым погрешностям при расчете надежности.

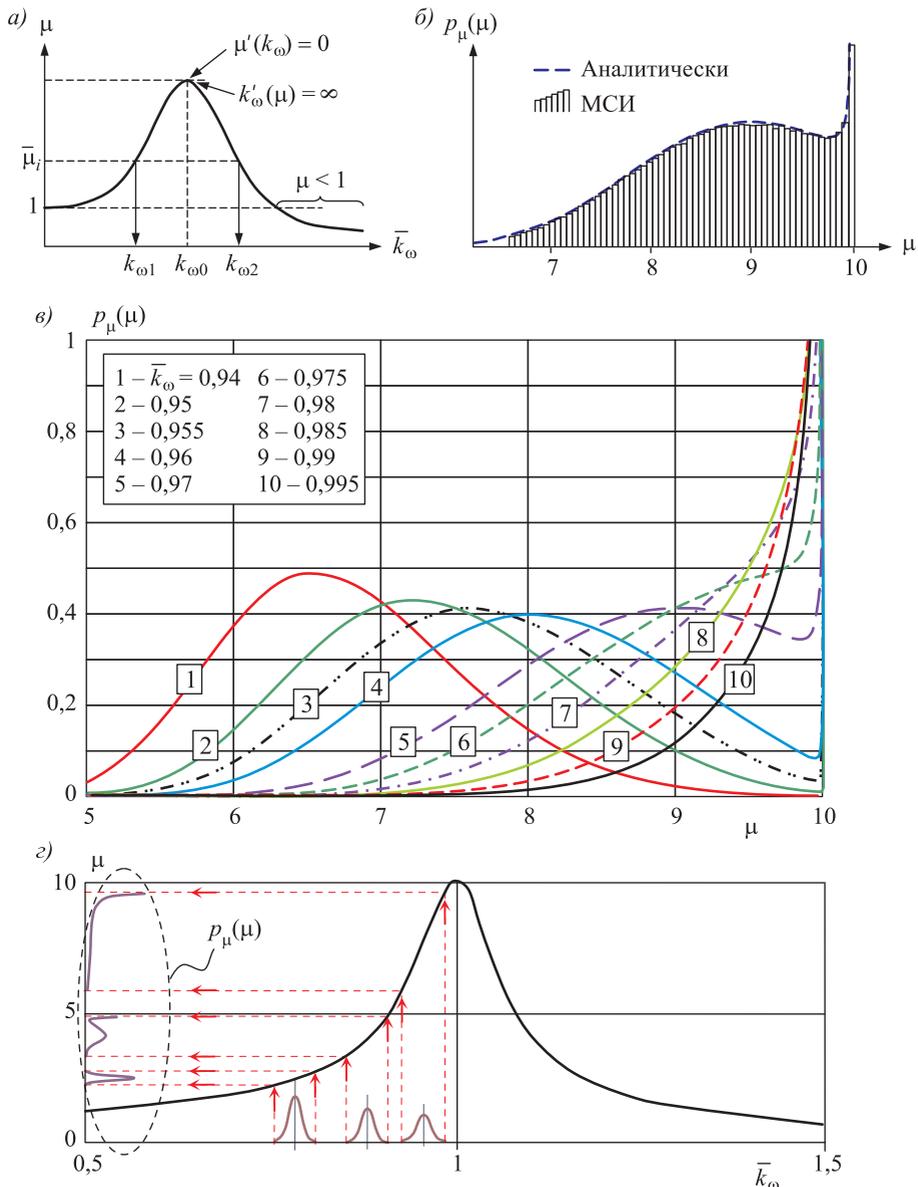


Рис. 6. Графики плотности распределения $p_\mu(\mu)$ с учетом демпфирования в зависимости от \bar{k}_ω

Для количественной оценки влияния описанных выше эффектов нелинейности АЧХ на результат расчета надежности используются понятия обобщенной прочности (сопротивления) \tilde{R} и обобщенной нагрузки (нагрузочного эффекта) \tilde{Q} [8, 9], которые являются случайными величинами. Условие безотказности в общем виде записывается как

$$\tilde{S} = \tilde{R} - \tilde{Q} \geq 0, \quad (11)$$

где \tilde{S} – резерв работоспособности.

В качестве расчетного критерия работоспособности при установившихся вынужденных гармонических колебаниях системы используем требование

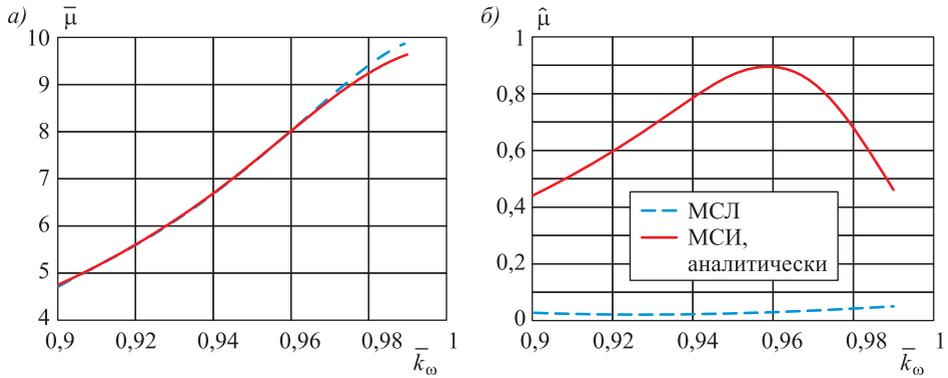


Рис. 7. Графики вероятностных характеристик динамического коэффициента с учетом демпфирования

a – математическое ожидание; *б* – стандарт

Отклонения значений вероятностных характеристик динамического коэффициента, вычисленных приближенным МСЛ, от точных (аналитических)

\bar{k}_ω	0,9	0,92	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,985	0,99
$\Delta\bar{\mu}, \%$	-0,78	-0,93	-0,85	-0,57	-0,003	0,90	2,01	2,54	2,98
$\Delta\hat{\sigma}, \%$	-91,7	-95,0	-96,2	-96,1	-95,7	-94,7	-92,5	-90,6	-87,7

непревышения динамическим коэффициентом предельно допустимого значения $[\mu]$:

$$\tilde{\mu} \leq [\mu], \tag{12}$$

тогда $\tilde{S} = [\mu] - \tilde{\mu}$.

На рис. 8, *б* показан принципиальный вид кривой плотности резерва работоспособности, соответствующей распределению $p_\mu(\mu)$ по рис. 8, *а*.

Вероятность отказа по принятому критерию находится как

$$P_f = \int_{-S_l}^0 p_S(S) dS. \tag{13}$$

Согласно (13) и рис. 8, *б*, на величину P_f существенно влияет именно «пикообразная» правая часть графика $p_\mu(\mu)$, обусловленная сильной нелинейностью АЧХ.

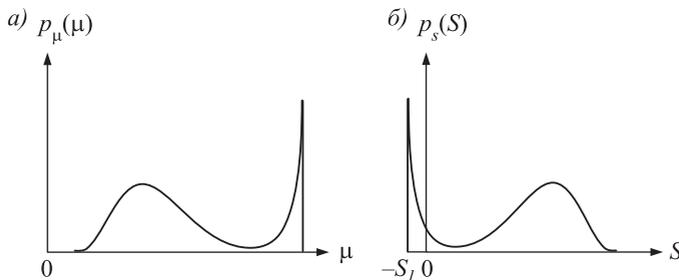


Рис. 8. Плотности распределения динамического коэффициента (*а*) и резерва работоспособности (*б*)

При $[\mu] = 3$ и указанных выше значениях A_{ω_0} , A_{ω_F} , γ вероятности отказа P_f , вычисленные по точным зависимостям и приближенно МСЛ, описываются графиками, приведенными на рис. 9. Погрешности определения P_f с использованием данных расчета по МСЛ достигают недопустимо больших значений в рассматриваемой резонансной области.

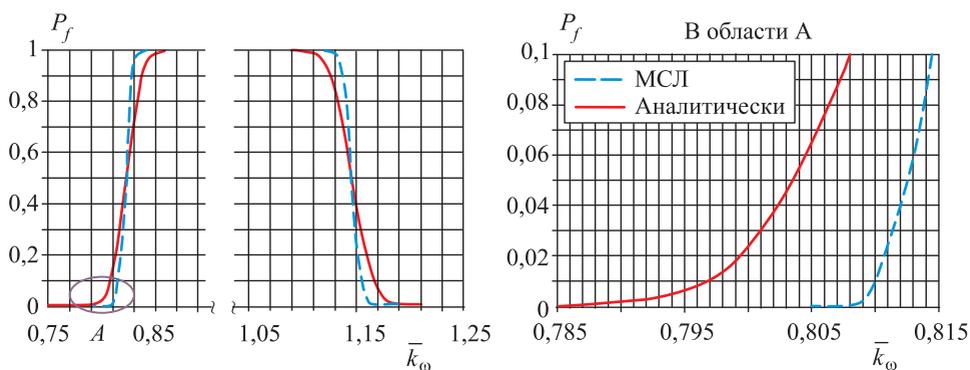


Рис. 9. График зависимости вероятности отказа P_f от \bar{k}_ω с учетом демпфирования

Аналогичные уточнения на основе полученных данных могут выполняться и при иных постановках задач расчета надежности, в частности, с требованиями по усталостной прочности материала [10, 11], динамической жесткости и др.

Выводы. 1. В результате выявления и исследования особенностей распределения динамического коэффициента для обобщенной модели системы с одной степенью свободы при установившихся вынужденных колебаниях с учетом демпфирования обнаружены принципиальные качественные и количественные трансформации распределения ДК по мере приближения рабочей частоты вынуждающего воздействия к собственной частоте системы – вследствие влияния сильной нелинейности амплитудно-частотной характеристики.

2. Сравнение значений стохастических характеристик ДК, вычисленных по точным аналитическим выражениям и приближенными методами, показало, что применение общепринятого в вероятностных расчетах метода статистической линеаризации для определения дисперсии или стандарта ДК в резонансной частотной области дает неприемлемые погрешности, поэтому очевидна необходимость использования предложенных уточненных решений.

3. Анализ графиков вероятности отказа для модельной системы с учетом демпфирования свидетельствует о существенном влиянии нелинейности АЧХ на показатели надежности гармонически нагруженных систем в рабочих режимах с частотами, приближающимися к резонансным.

4. Учет сильной нелинейности АЧХ в зоне резонанса особенно актуален в расчетах надежности систем с динамическими гасителями колебаний, характеризующихся сгущенным спектром собственных частот в области рабочей частоты вибрационного воздействия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Высш. шк., 1999. 576 с.
2. Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Наука, 1971. 256 с.
3. Корнев Б.Г., Резников Л.М. Динамические гасители колебаний: Теория и технические приложения. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 304 с.
4. Смирнов А.Ф., Александров А.В., Лашеников Б.Я., Шапошников Н.Н. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений / под ред. А.Ф. Смирнова. М.: Стройиздат, 1984. 416 с.
5. Chopra A.K. Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering. Third Edition. New Jersey, Upper Saddle River, 2007. 876 p.
6. Ляхович Л.С. Особые свойства оптимальных систем и основные направления их реализации в методах расчета сооружений. Томск: Изд-во Том. гос. архитектурно-строит. ун-та, 2009. 372 с.
7. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела: Сопротивление материалов с элементами теории сплошных сред и строительной механики. Т. 3. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. 480 с.
8. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М.: Стройиздат, 1978. 239 с.
9. Райзер В.Д. Теория надежности сооружений. М.: Изд-во АСВ, 2010. 384 с.
10. Себешев В.Г., Гербер Ю.А. Анализ влияния стохастической изменчивости параметров конструкций с динамическими гасителями колебаний на надежность при гармонических нагрузках // Вестн. Том. гос. архитектурно-строит. ун-та. 2014. № 4. С. 93–105.
11. Себешев В.Г., Гербер Ю.А. Оценка надежности и долговечности по условию усталостной прочности стержневых систем с динамическим гасителем колебаний при гармонических воздействиях // Проблемы оптимального проектирования сооружений: докл. 3-й Всерос. конф., Новосибирск, 15–17 апр., 2014 г. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2014. С. 367–380.

Гербер Юрий Андреевич, асп.; E-mail: jura.gerber@yandex.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Себешев Владимир Григорьевич, канд. техн. наук, проф., почет. чл. РААСН;

E-mail: sebeshev@sibstrin.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 19.04.17

Gerber Yuriy Andreevich, Post-graduate Student; E-mail: jura.gerber@yandex.ru

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

Sebeshev Vladimir Grigor'evich, PhD, Professor, Hon. Mem. RAACS;

E-mail: sebeshev@sibstrin.ru

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

PECULIARITIES OF RELIABILITY ANALYSIS OF DYNAMICALLY LOADED SYSTEMS WITH TAKING INTO ACCOUNT THE NON-LINEARITY EFFECTS OF THE FREQUENCY-RESPONSE CURVES IN THE RESONANCE ZONES

The questions important for improvement and making more precise reliability analysis of harmonic loaded systems with exciting frequencies close to the resonant one are considered. Specific features of probabilistic properties of dynamic response factor as most

informative characteristic of system's stress-strain state, caused by big gradients of the frequency-response curves (FRC) in the area of natural frequencies are investigated. Analytical and approximate methods descriptions of probability distribution density of dynamic response factor taking into account and without damping are received, characteristics of distribution functions are revealed. Qualitative and quantitative results of failure probability calculations on rated criterion of serviceability with use exact and approximate decisions are provided. The errors resulting from the use of approximate methods of probability calculation are estimated, the necessity is substantiated and the possibilities of applying the specified refined methods in the reliability calculations of dynamically deformable systems in resonance frequency domains are indicated, which is actual, in particular, for structures with vibration dampers.

Key words: reliability, probability of failure, multi-degree-of-freedom systems, harmonic load, resonance, dynamic response factor, strong non-linearity of FRC, probability density function.

REFERENCES

1. V e n t t s e l E.S. Teoriya veroyatnostey [The theory of probability]. Moscow, Vysshaya shkola [Higher School], 1999. 576 p. (in Russian)
2. B o l o t i n V.V. Primeneniye metodov teorii veroyatnostey i teorii nadezhnosti v raschetakh sooruzheniy [Use of the probability theory methods and reliability theory for structural analysis]. Moscow, Nauka [Science], 1971. 256 p. (in Russian)
3. K o r e n e v B.G., R e z n i k o v L.M. Dinamicheskie gasiteli kolebaniy: Teoriya i tekhnicheskie prilozheniya [Dynamic dampers of vibrations: Theory and technical applications]. Moscow, Nauka [Science], 1988. 304 p. (in Russian)
4. S m i r n o v A.F., A l e k s a n d r o v A.V., L a s h c h e n i k o v B.Ya., S h a p o s h n i k o v N.N. Stroitel'naya mekhanika. Dinamika i ustoychivost' sooruzheniy [Structural mechanics. Dynamics and stability of structures]. Edit. by A.F. Smirnov. Moscow, Stroyizdat, 1984. 416 p. (in Russian)
5. C h o p r a A.K. Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering. Third Edition. New Jersey, Upper Saddle River, 2007. 876 p.
6. L y a k h o v i c h L.S. Osobyie svoystva optimal'nykh sistem i osnovnye napravleniya ikh realizatsii v metodakh rascheta sooruzheniy [Special properties of optimal systems and the basic directions of their realization in methods of structural design]. Tomsk, Tomsk State University of Architecture and Building, 2009. 372 p. (in Russian)
7. F i l i n A.P. Prikladnaya mekhanika tverdogo deformiruemogo tela: Soprotivlenie materialov s elementami teorii sploshnykh sred i stroitel'noy mekhaniki. T. 3 [Applied mechanics of solids: Strength of materials with elements of the continuums theory and mechanics of structures. Vol. 3]. Moscow, Nauka [Science], 1981. 480 p. (in Russian)
8. R z h a n i t s y n A.R. Teoriya rascheta stroitel'nykh konstruksiy na nadezhnost' [The theory of building structures reliability analysis]. Moscow, Stroyizdat, 1978. 239 p. (in Russian)
9. R a y z e r V.D. Teoriya nadezhnosti sooruzheniy [Theory reliability of structures]. Moscow, Izdatel'stvo ASV [Publishing office of the Association of Construction Higher Educational Institutions], 2010. 384 p. (in Russian)
10. S e b e s h e v V.G., G e r b e r Y u . A . A n a l i z v l i y a n i y a s t o k h a s t i c h e s k o y i z m e n c h i v o s t i p a r a m e t r o v k o n s t r u k t s i y s d i n a m i c h e s k i m i g a s i t e l y a m i k o l e b a n i y n a n a d e z h n o s t ' p r i g a r m o n i c h e s k i k h n a g r u z k a k h [Analysis of random parameters' influence on the reliability of harmonically loaded structures with dynamic dampers]. Tomsk, Vestnik

- TGASU [Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building]. 2014. No. 4. Pp. 93–105. (in Russian)
11. Se b e s h e v V.G., G e r b e r Yu.A. Otsenka nadezhnosti i dolgovechnosti po usloviyu ustalostnoy prochnosti sterzhnevnykh sistem s dinamicheskim gasitelem kolebaniy pri garmonicheskikh vozdeystviyakh [Evaluation of reliability and longevity of rod systems with dynamic vibrations damper under the limitations of fatigue durability at harmonic excitation]. Problemy optimal'nogo proektirovaniya sooruzheniy: doklady 3 Vserossiyskoy konferentsii [Proc. All-Rus. Conf. "Problems of Optimal Design of Structures"]. Novosibirsk, 2014. Pp. 367–380. (in Russian)
-

УДК 539.38 : 691.928

А.С. САМОШКИН, В.М. ТИХОМИРОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫМИ МЕТОДАМИ

Работоспособность железобетонных изделий в значительной мере определяется условиями взаимодействия арматуры с бетоном. В работе представлено комплексное исследование этого процесса, которое состояло из трех этапов: экспериментального, теоретического и численного расчета методом конечных элементов. Разработана математическая модель железобетона с трехслойной структурой (арматура, контактный слой, бетон), которая позволяет учитывать взаимодействие арматуры с бетоном и их физическую нелинейность. Для идентификации параметров модели предложены алгоритмы, использующие экспериментальные данные испытаний материалов. Численный анализ методом конечных элементов показал удовлетворительную сходимость с опытными данными, в том числе и при нелинейном деформировании компонентов железобетонной конструкции.

К л ю ч е в ы е с л о в а: железобетон, нелинейное деформирование, испытания, математическая модель, численный анализ.

Важным направлением развития современных железобетонных конструкций является разработка и применение эффективных видов металлической и неметаллической арматуры. В свою очередь работоспособность железобетонных изделий в значительной мере определяется условиями взаимодействия арматуры с бетоном (сцеплением), которые обусловлены сложной геометрией поверхности армирующего стержня, а также неоднородностью бетона и нелинейным характером его деформирования [1]. Современный уровень механики структурно-неоднородных и физически нелинейных материалов, к которым относится железобетон, позволяет, сочетая экспериментальные исследования с методами математического моделирования и численного анализа, решать задачи контактного взаимодействия структурных компонентов композиционного материала.

В данной работе проведены комплексные исследования взаимодействия профилированной арматуры с бетоном, которые состояли из трех частей экспериментальной, теоретической и расчетной. При построении математической модели железобетона были использованы теории пластичности [2] и процедуры решения физически нелинейных задач [3, 4]. При этом была решена практически важная задача идентификации параметров предложенной модели [5], алгоритмы которой основывались на малом числе экспериментальных данных и положениях технической теории сцепления [1].

1. Экспериментальные исследования. На рис. 1 представлена схема испытаний железобетона, которая была выбрана с учетом опыта подобных исследований [1, 6]. Такая схема позволяет исследовать непосредственно процесс сцепления, исключив влияние других факторов деформирования

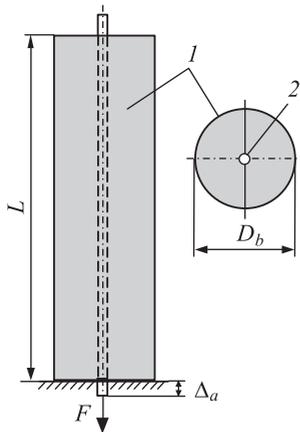


Рис. 1. Схема вытягивания арматуры из бетонной обоймы
1 – бетонная обойма; 2 – арматура

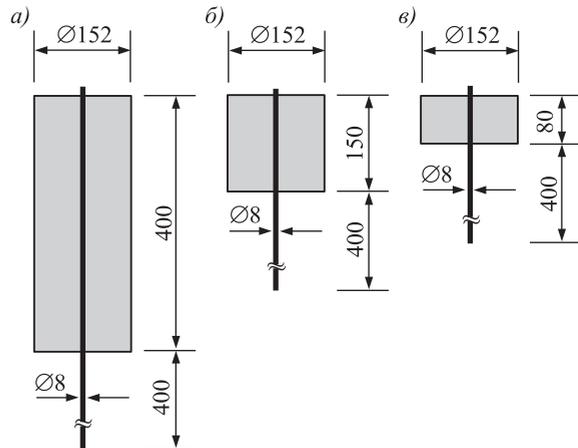


Рис. 2. Размеры длинных (а), средних (б) и коротких (в) железобетонных образцов

железобетона таких, как кратковременная ползучесть бетона и окружная жесткость бетонной обоймы. При этом основными данными о свойствах сцепления являются перемещения арматуры относительно торца бетонной обоймы Δ_a . Полученную таким образом диаграмму $F - \Delta_a$ можно считать обобщенной механической характеристикой сцепления для используемой пары арматура–бетон.

Были проведены испытания трех серий по пять железобетонных образцов в каждой, при изготовлении которых применялась профилированная арматура номинальным диаметром 8 мм и марки А400.

На рис. 2 представлена геометрия длинных, средних и коротких образцов, которые выбирались по следующим принципам:

- диаметр бетонной обоймы должен обеспечивать жесткость и прочность, которая достаточна для восприятия радиальных усилий;
- размер анкеровки L длинных образцов должен быть больше, чем длина области нелинейного деформирования бетона в зоне контакта;
- для коротких и средних образцов длина L по предварительным расчетам соответствовала условию: предельное состояние по всей поверхности

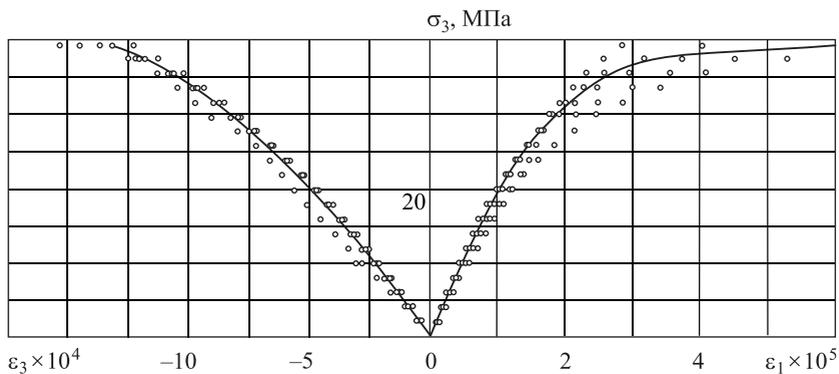


Рис. 3. Диаграмма деформирования бетона

соединения арматуры с бетоном наступает или в упругой, или в пластической стадии работы арматуры соответственно.

Для определения механических характеристик бетона одновременно с основными образцами были изготовлены и сохранялись в одинаковых условиях твердения в течение 67 сут контрольные кубы размером $100 \times 100 \times 100$ мм и призмы $100 \times 100 \times 400$ мм.

На рис. 3 представлена диаграмма деформирования бетона, полученная по результатам испытания контрольных призм на одноосное сжатие. Здесь ϵ_3 и ϵ_1 – продольные и поперечные относительные деформации; σ_3 – напряжения в поперечном сечении образца. Сплошная линия представляет результаты аппроксимации данных кубическим сплайном.

В результате статистической обработки результатов испытаний контрольных образцов были определены следующие механические характеристики бетона:

призменная прочность σ_{pc} 40,2 МПа
 модуль деформаций E_c 38,3 ГПа
 коэффициент Пуассона ν_c 0,21.

На рис. 4 представлена диаграмма растяжения арматурной стали, по которой получены ее механические характеристики:

модуль упругости E_a 200 ГПа
 предел текучести σ_{ya} 400 МПа
 предел прочности σ_{ua} 610 МПа.

Нагружение железобетонных образцов производилось на испытательной механической машине ZDM-5/91 в специально изготовленной для этого стальной раме (рис. 5).

Нагрузка на образец прикладывалась в ступенчатом режиме с равными интервалами увеличения по 1000 Н вплоть до разрушения образца. Для учета реологических процессов деформирования, которые протекают в зоне

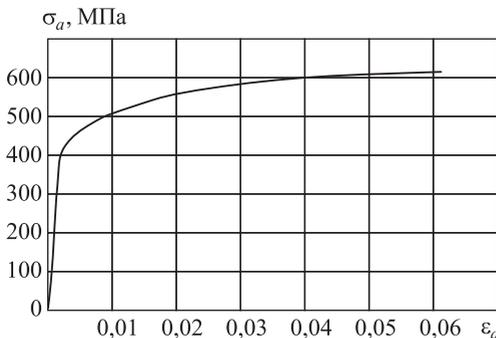


Рис. 4. Диаграмма растяжения арматуры А400 $\varnothing 8$ мм

Рис. 5. Вид образца, установленного на испытательную машину



сцепления арматуры с бетоном, на каждом шаге приращения нагрузки осуществлялась ее выдержка до статического равновесия образца. После чего фиксировалось перемещение арматуры относительно торца бетонной обоймы Δ_a . На рис. 6 светлыми точками представлены результаты испытаний коротких и длинных образцов. Сплошные линии соответствуют результатам их статистической обработки.

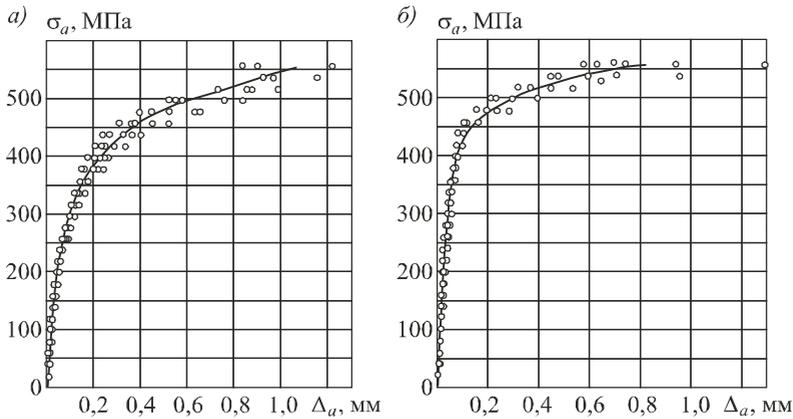


Рис. 6. Результаты испытаний коротких (а) и длинных (б) железобетонных образцов

Для определения характеристик сцепления диаграмма, полученная для длинных образцов, в диапазоне упругой работы арматуры ($\sigma_a < 400$ МПа) аппроксимировалась соотношением [7]

$$\Delta_a = \frac{1}{\alpha} \left[\exp \left(\frac{\sigma_a^2 \alpha}{m B} \right)^{1/2} - 1 \right]; \quad (1)$$

$$m = \frac{p A_b E_a E_b}{A_a (E_b A_b + E_a A_a)},$$

где A_a , A_b и E_a , E_b – площади сечений и модули упругости арматуры и бетона;

p – периметр сечения арматурного стержня.

В результате были вычислены значения базовых параметров сцепления для данной пары арматура–бетон:

$$\alpha = 30,4 \text{ мм}^{-1}, \quad B = 44,9 \text{ МПа.}$$

2. Математическая модель железобетона. В работах [5, 7–9] представлены исследования по развитию математической модели железобетона, которая дает возможность учесть контактное взаимодействие арматуры с бетоном. В результате была предложена модель, состоящая из трех однородных сплошных тел (рис. 7): бетон, арматура и контактный слой (КС). При этом контакт составных элементов предполагается идеальным, а арматура моделируется круговым цилиндром с гладкой поверхностью. Такие упро-

щения позволяют рассматривать проблему контактного взаимодействия как задачу механики сплошной среды.

Наиболее важной частью данной модели является КС, механические свойства которого должны учитывать нелинейные процессы, происходящие при смещении арматуры относительно бетона в зоне контакта.

Для материалов составных частей модели были выбраны соотношения, описывающие процесс их деформирования. Для бетона характерны нелинейное поведение под нагрузкой и различное сопротивление растяжению и сжатию. Как иллюстрация этого факта, на рис. 8 пунктирной линией показана типичная диаграмма при его одноосном нагружении.

Анализ функций пластичности, которые используются для моделирования свойств бетона [10], позволил выбрать линейный закон Друкера – Прагера [11]

$$(3J_2)^{1/2} + \gamma I_1 = k, \quad (2)$$

здесь I_1 – первый инвариант тензора напряжений;

J_2 – второй инвариант девиатора напряжений;

γ и k – постоянные, которые определяются по экспериментальным данным на одноосное растяжение σ_{ut} и σ_{uc} :

$$\gamma = \frac{\sigma_{uc} - \sigma_{ut}}{\sigma_{uc} + \sigma_{ut}}; \quad k = \frac{2\sigma_{uc}\sigma_{ut}}{\sigma_{uc} + \sigma_{ut}}. \quad (3)$$

На рис. 8 сплошной линией показана диаграмма деформирования материала, полученная с использованием соотношения (1) в постановке упругоидеальной пластичности. При сравнении экспериментальных и расчетных данных сделан вывод об адекватности выбранного закона пластичности.

Для армирования бетона применяются материалы, сопротивление которых растяжению и сжатию одинаково. Следовательно, при описании их нелинейного деформирования можно использовать критерий Хубера–Мизеса [2], соотношения для которого можно получить из выражения (2), положив коэффициент $\gamma = 0$,

$$(3J_2)^{1/2} = k. \quad (4)$$

При этом напряжение k соответствует пределу текучести материала арматуры. Использование этого критерия позволяет также учитывать и стадию упрочнения материала арматуры.

Контактный слой моделируется упругопластическим телом. При выборе функции пластичности для материала КС необходимо учесть, что при смещении гладкой арматуры относительно бетона его радиальные деформации будут незначительны. Следовательно, КС будет испы-

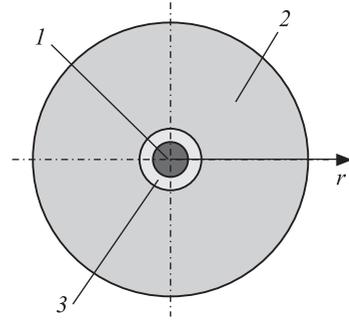


Рис. 7. Структурная схема модели железобетона

1 – арматура; 2 – бетон; 3 – контактный слой

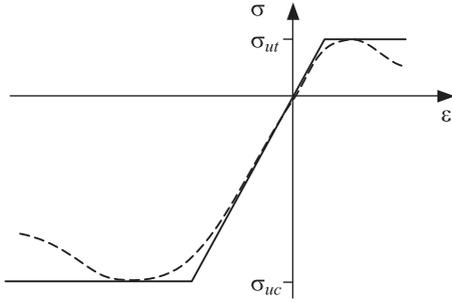


Рис. 8. Экспериментальная и расчетная диаграммы деформирования бетона

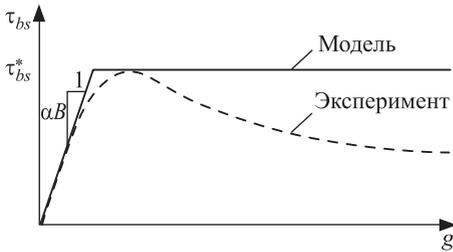


Рис. 9. Экспериментальные и модельные графики зависимости касательных напряжений от смещения арматуры

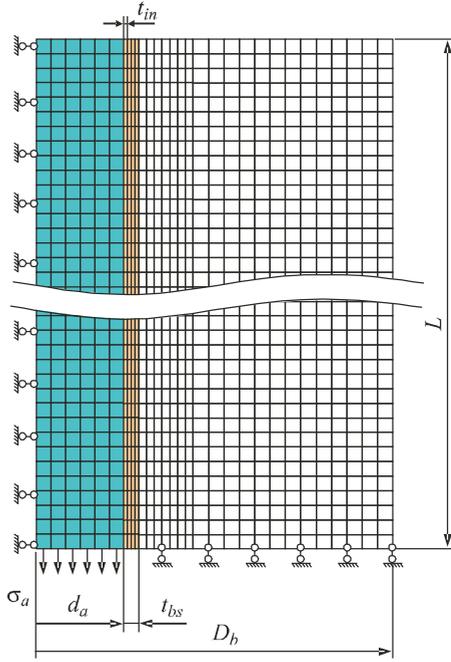


Рис. 10. Осесимметричная конечно-элементная модель

тывать квазичистый сдвиг, при котором первый инвариант тензора напряжений $I_1 \approx 0$. Поэтому для описания условий перехода этого слоя в пластическое состояние также можно применить критерий Хубера – Мизеса (4).

Механические характеристики КС необходимо связать с базовыми параметрами сцепления α и B [1]. Рассмотрим предельное состояние КС, когда касательные напряжения достигают максимального значения τ_{bs}^* . В предположении о преимущественно сдвиговом характере деформирования КС и справедливости критерия (4) получим

$$(3J_2)^{1/2} \approx \sqrt{3}\tau_{bs}^* = k_{bs}, \quad (5)$$

здесь k_{bs} – предел текучести контактного слоя.

Максимальные напряжения сцепления τ_{bs}^* определим, используя зависимость τ_{bs} от перемещений g [1], которая была применена при выводе соотношения (1)

$$\tau = B \frac{\ln(1 + \alpha g)}{1 + \alpha g}. \quad (6)$$

Приравняв первую производную $\frac{d\tau_{bs}}{dg}$ к нулю, получим

$$\tau_{bs}^* = 0,386B.$$

Тогда, учитывая равенство (5), можно определить предел текучести КС

$$k_{bs} = 0,638B. \quad (7)$$

При упругом деформировании КС, используя соотношения чистого сдвига, можно записать зависимость смещений g от деформаций γ

$$g = \alpha B \frac{E_{bs}\gamma}{2(1+\nu)}, \quad (8)$$

здесь E_{bs} – модуль упругости КС;
 ν – коэффициент Пуассона.

Взаимное смещение арматуры и бетона в основном определяется деформациями сдвига, распределенными по толщине КС t_{bs}

$$g = \int_0^{t_{bs}} \gamma dr. \quad (9)$$

Сопоставляя (8) и (9), определим E_{bs}

$$E_{bs} = 2\alpha B (1+\nu) n t_{bs}, \quad (10)$$

здесь n – коэффициент заполнения эпюры деформаций сдвига γ по толщине КС:

$$n = \frac{g}{\gamma_0 t_{bs}}, \quad (11)$$

где γ_0 – деформация сдвига на границе КС и арматуры.

На рис. 9 показаны графики зависимости τ_{bs} и g , полученные по экспериментальным данным (штриховая линия) и в соответствии с выбранной моделью (сплошная линия).

Модель железобетона, составленная из физически нелинейных материалов, может быть реализована с помощью методов вычислительной механики [3], среди которых следует выделить метод конечных элементов (МКЭ). Его основным достоинством является возможность решать задачи механики деформируемого твердого тела (МДТТ) в различной постановке. В нашем случае для описания деформирования бетона и арматуры необходимо выбрать геометрически линейную формулировку определяющих соотношений МДТТ, а для контактного слоя – текущую лагранжеву, так как в данной зоне могут возникать большие пластические деформации сдвига. Решение задачи производится пошаговым интегрированием линеаризованных уравнений МКЭ. В качестве меры шага выбирается фиктивное время, изменение которого соответствует приращению управляющего параметра, в нашем случае – перемещению узла конечного элемента [12]. Такая процедура решения будет аналогична жесткому нагружению конструкции. Для уточнения решения применяется стандартный итерационный метод Ньютона–Рафсона.

На рис. 10 представлена осесимметричная конечно-элементная модель, реализующая схему вытягивания арматуры из бетона (см. рис. 1). В результа-

те численных экспериментов с различными геометрическими параметрами сетки КЭ были установлены следующие соотношения:

– для радиального размера КЭ контактного слоя t_{in}

$$0,0834d_a \leq t_{in} \leq 0,125d_a ;$$

– толщины контактного слоя t_{bs}

$$5t_{in} \leq t_{bs} \leq 0,05D_b ;$$

– коэффициента заполнения эпюры деформаций сдвига

$$n = 0,78.$$

3. Численное моделирование. Моделировалось вытягивание упруго-пластической профилированной арматуры – задача, экспериментальная реализация которой описана в п. 1. Параметры конечно-элементной модели (см. рис. 9) были определены по соотношениям (6), (7) и рекомендациям, представленным в п. 2. В таблице приведены механические характеристики бетона, арматуры и контактного слоя.

Параметры численной модели вытягивания профилированной арматуры из бетона

Образец	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона	Коэффициенты критерия пластичности		Число КЭ
			γ	k , МПа	
Арматура	210	0,3	0	400	17 600
Бетон	38	0,2	0,874	5,23	
КС	6,4	0,2	0	28,66	

На рис. 11 светлыми точками показаны данные испытаний длинных образцов, а сплошной линией – результаты численного моделирования. Видно, что жесткость численной модели при нагрузке на арматуру, превышающей 400 МПа, выше, чем реального образца. Это связано с тем, что арматура

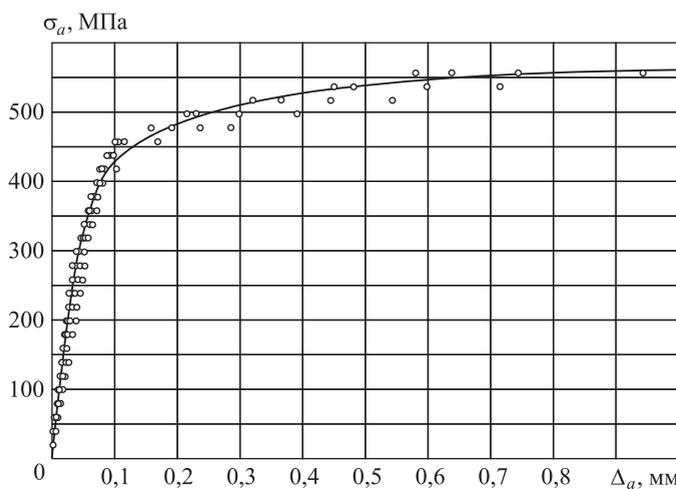


Рис. 11. График зависимости $\sigma_a - \Delta_a$ для длинных образцов

под действием радиальных усилий, которые возникают при смещении ее относительно бетона, находится в сложном напряженном состоянии.

Можно отметить, что начало нелинейного деформирования арматуры в реальном образце и численной модели не совпадает, так как при расчетах по выбранной модели не моделируются усилия распора и поэтому напряженное состояние арматуры близко к линейному, при котором сопротивление пластическим деформациям снижается. Тем не менее практически во всем диапазоне нагружения расчетные и экспериментальные данные хорошо совпадают.

При численном моделировании короткого образца его жесткость оказалась значительно выше экспериментально измеренной. Это объясняется тем, что модель контактного слоя не учитывает уменьшение сопротивления сдвигу материала контактной зоны при больших уровнях смещения арматуры (см. рис. 8).

Заключение. Проведено исследование взаимодействия профилированной арматуры с бетоном, которое состояло из трех этапов: экспериментального, теоретического и численного расчета МКЭ.

Экспериментальные результаты показали, что кривые податливости арматуры зависят от длины анкеровки. Данные, полученные для длинных образцов, позволили получить параметры сцепления α и B .

Для численного анализа МКЭ разработана математическая модель железобетона с введением между арматурой и бетоном специального слоя, который моделировал взаимодействие арматуры с бетоном.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Холмянский М.М. Бетон и железобетон: Деформативность и прочность. М.: Стройиздат, 1997. 576 с.
2. Писаренко С.Г., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев: Наук. думка, 1976. 415 с.
3. Zienkiewicz O.C. The finite element method in engineering science. London, McGraw-Hill Publishing Co., 1971. 521 p.
4. Коробейников С.Н. Нелинейное деформирование твердых тел. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 262 с.
5. Самошкин А.С., Тихомиров В.М. Математическая модель деформирования железобетона с учетом контактного взаимодействия его структурных компонентов // Вычислительные технологии. 2017. Т. 22, спецвып. 1. С. 75–86.
6. Shima H., Chou L.-L., Okamura H. Micro and macro models for bond in reinforced concrete // Journal of the Faculty of Engineering. 1987. Vol. 39, No. 2. P. 133–194.
7. Тихомиров В.М., Астахов Ю.В., Самошкин А.С. Моделирование упругопластического сцепления арматуры с бетоном // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 2. С. 103–109.
8. Тихомиров В.М., Самошкин А.С. Численное решение нелинейных задач теории железобетона // Проблемы оптимального проектирования сооружений: докл. 4-й Всерос. конф. Новосибирск, 2017. С. 272–279.
9. Тихомиров В.М., Самошкин А.С. Математическая модель растяжения железобетонных элементов конструкций с учетом разрушения бетона // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 10–11. С. 13–21.

10. Yu M. Advances in strength theories for materials under complex stress state in the 20th century // Applied Mechanics Reviews. 2002. Vol. 55, No. 3. P. 169–218.
11. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design // Quarterly of Applied Mathematics. 1952. Vol. 10, No. 2. P. 157–165.
12. COSMOSM User Guide. Vol. 4: Advanced Modules. Santa Monica (CA): Structural Research and Analysis Corporation, 2007. 278 p.

Самошкин Антон Сергеевич, асп.; E-mail: ASSamoshkin.stu@gmail.com
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск
Тихомиров Виктор Михайлович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: twm@stu.ru
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено 18.04.17

Samoshkin Anton Sergeevich, Post-graduate Student;
E-mail: ASSamoshkin.stu@gmail.com
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia
Tikhomirov Victor Mikhaylovich, DSc, Professor; E-mail: twm@stu.ru
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

STUDY OF NONLINEAR DEFORMATION OF REINFORCED CONCRETE BY EXPERIMENTAL-CALCULATED METHODS

The efficiency of reinforced concrete products is largely determined by the bond-slip relation. In the paper conducted comprehensive analysis of this process, which consisted of three stages: experimental, theoretical and analysis of the FEM. The compliance curves of the reinforcement were experimentally obtained, including the nonlinear deformation. As a result, it is shown that the bonding properties depend on the anchoring length, and the effective length of the embedding is determined. For numerical analysis of FEM, a mathematical model of reinforced concrete with the introduction of a special layer between the reinforcement and concrete, which simulated the interaction of reinforcement with concrete, was developed. The characteristics of the layer were determined from the experimental coupling parameters. The deformation of concrete and reinforcement was described by relationships that allowed to take into account the physical nonlinearity of these materials. This model allowed to adequately describe the joint deformation of reinforcement and concrete.

Key words: reinforced concrete, nonlinear deformation, testing, mathematical model, numerical analyses.

REFERENCES

1. Kholmynskiy M.M. Beton i zhelezobeton: Deformativnost' i prochnost' [Concrete and reinforcing concrete. The deformability and strength]. Moscow, Stroyizdat, 1997. 576 p. (in Russian)
2. Pisarenko S.G., Lebedev A.A. Deformirovanie i prochnost' materialov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii [Deformation and strength of materials in complex stress state]. Kiev, Naukova dumka, 1976. 415 p. (in Russian)
3. Zienkiewicz O.C. The finite element method in engineering science. London, McGraw-Hill Publishing Co., 1971. 521 p.
4. Korobeynikov S.N. Nelineynoe deformirovanie tverdykh tel [Nonlinear deformation of solids]. Novosibirsk, 2000. 262 p. (in Russian)

5. Samoshkin A.S., Tikhomirov V.M. Matematicheskaya model' deformirovaniya zhelezobetona s uchetom kontaktного vzaimodeystviya ego strukturnykh komponentov [Mathematical model of reinforced concrete deformation with considering contact interaction of its structural components]. Vychislitel'nye tekhnologii [Computational Technologies]. 2017. Vol. 22. S1. Pp. 75–86. (in Russian)
 6. Shima H., Chou L.-L., Okamura H. Micro and macro models for bond in reinforced concrete. Journal of the Faculty of Engineering. 1987. Vol. 39, No. 2. Pp. 133–194.
 7. Tikhomirov V.M., Astakhov Yu.V., Samoshkin A.S. Modelirovanie uprugoplasticheskogo stsepleniya armatury s betonom [The modelling of elastic-plastic interaction fiber reinforcement with concrete]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No. 2. Pp. 103–109. (in Russian)
 8. Tikhomirov V.M., Samoshkin A.S. Chislennoe reshenie nelineynykh zadach teorii zhelezobetona [Numerical solution of nonlinear problems of reinforced concrete]. Problemy optimal'nogo proektirovaniya sooruzheniy: doklady 4-y Vserossiyskoy konferentsii [Problems of Optimal Design of Structures: Reports of the 4th All-Russian Conference]. Novosibirsk, 2017. Pp. 272–279. (in Russian)
 9. Tikhomirov V.M., Samoshkin A.S. Matematicheskaya model' rastyazheniya zhelezobetonnykh elementov konstruktsiy s uchetom razrusheniya betona [Mathematical model of reinforced concrete structural elements tension with regard to fracture of concrete]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 10–11. Pp. 13–21. (in Russian)
 10. Yu M. Advances in strength theories for materials under complex stress state in the 20th century. Applied Mechanics Reviews. 2002. Vol. 55, No. 3. Pp. 169–218.
 11. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. Quarterly of Applied Mathematics. 1952. Vol. 10, No. 2. Pp. 157–165.
 12. COSMOSM User Guide. Vol. 4: Advanced Modules. Santa Monica (CA): Structural Research and Analysis Corporation, 2007. 278 p.
-

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ



УДК 691.54:620.18

**Г.И. БЕРДОВ, А.Ф. БЕРНАЦКИЙ, П.М. ПЛЕТНЕВ,
В.Ф. ХРИТАНКОВ, С.А. ВИНОГРАДОВ, П.В. СЕМИКИН**

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА С ВОДОЙ МЕТОДОМ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ДИЭЛЬКОМЕТРИИ

Несмотря на многочисленные исследования в области цементного материаловедения, многие экспериментальные факты не нашли должного объяснения из-за сложности протекающих физико-химических процессов в системе цемент-вода. Показатели диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости, измеренные после затворения цемента водой, могут дать важную информацию как о происходящих процессах в системе цемент-вода с добавками, так и о структурном состоянии цементного камня, что позволит научно обоснованно усовершенствовать составы и технологию получения строительных материалов на основе цемента. Экспериментально показана взаимосвязь между изменением диэлектрических потерь (добротности) во времени и протекающими процессами адсорбции и гидратации при затворении водой цемента и волластонита, что связано с последовательным изменением состояния воды от свободного к сорбированному и химически связанному. Такая взаимосвязь между структурно-чувствительными диэлектрическими характеристиками водных цементных суспензий и протекающими в них процессами позволяет рассматривать диэлькометрию как высокоинформативный метод анализа при выборе различных добавок и совершенствовании технологических режимов получения цементных материалов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: портландцемент, цементный камень, диэлькометрия, диэлектрические свойства, структура.

При гидратационном твердении портландцемента происходит интенсивное взаимодействие его с водой, завершаемое формированием плотной структуры искусственного камня с переходом ее от коагуляционной к кристаллизационной [1]. Энергетическое состояние молекул воды в концентрированных цементных суспензиях определяет последующее развитие структуры цементного камня. Это состояние может быть исследовано диэлектрическим методом [2].

Диэлькометрия (или диэлектрометрия) – метод исследования структуры и свойств веществ путем определения их диэлектрических свойств – диэлек-

© Бердов Г.И., Бернацкий А.Ф., Плетнев П.М., Хриганков В.Ф., Виноградов С.А., Семикин П.В., 2017

трической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ [3, 4]. Диэлектрическая проницаемость характеризует поляризацию веществ под действием электрического поля, $\text{tg}\delta$ – потери в нем энергии поля. При высокочастотном диэлькометрическом анализе используются емкостные измерительные ячейки и измерители добротности. Экспериментально определяют электрическую емкость и добротность измерительного контура.

У цементных материалов диэлектрические свойства не относятся к числу эксплуатационных, поэтому они мало исследованы. О диэлектрических свойствах клинкерных минералов можно судить по аналогии с другими силикатами, такими как волластонит, форстерит, протоэнстатит. Их диэлектрическая проницаемость невелика (ϵ менее 10), а диэлектрические потери малы $\text{tg}\delta < 10^{-3}$ [5, 6]. У кристаллогидратов, содержащих связанную воду (гипс, тальк и др.), диэлектрическая проницаемость выше (ϵ около 20) и больше уровень диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = (2-8) \cdot 10^{-3}$ [7].

Молекулы воды имеют большой дипольный момент, что обуславливает высокий уровень диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 81$) и диэлектрических потерь. Анализируя диэлектрические свойства гидратирующейся системы цемент-вода, можно определить изменение энергетического состояния в ней молекул воды. Это позволяет сделать обоснованный выбор количества добавок к цементу (дисперсных материалов, электролитов, пластификаторов) и оптимальных технологических режимов изготовления бетона (температура и длительность тепловлажностной обработки) [8, 9].

Измерение диэлектрических свойств концентрированных цементных суспензий (цементного теста) и цементного камня в работе проведено с помощью измерителя добротности Tesla BM-560 на частотах 1,3–1,7 МГц при температуре +20 °С. В частотном диапазоне от 10^6 до 10^8 Гц информативные результаты при исследовании кристаллических веществ, содержащих полярные молекулы воды (гипс, тальк), соответствуют частотам 10^6 – 10^7 Гц [7]. При измерениях определялись добротность колебательного контура с незаполненной измерительной ячейкой Q_1 и его емкость C_1 , а также добротность Q_2 и емкость C_2 контура с ячейкой, заполненной исследуемым материалом. Разность значений добротности $\Delta Q = Q_1 - Q_2$ характеризует диэлектрические потери в исследуемом материале. При этом тангенс угла диэлектрических потерь обратно пропорционален значению добротности ΔQ , а электрическая емкость ΔC прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости.

Концентрированные цементные композиции обладают большой сквозной электрической проводимостью [10]. Для ее исключения использована специальная емкостная измерительная ячейка (рис. 1). Она представляет собой стакан из полиэтилена 2, закрываемый полиэтиленовой крышкой 3. Полиэтилен высокого давления обладает низкой

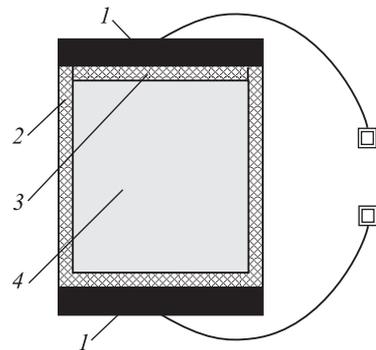


Рис. 1. Измерительная ячейка
1 – металлические электроды; 2 – измерительная ячейка из полиэтилена; 3 – полиэтиленовая крышка; 4 – исследуемый материал

электропроводностью $\rho_v = 10^{15}$ Ом·м [11]. К крышке и дну цилиндра плотно крепятся стальные электроды 1. Заполняемый исследуемой суспензией объем ячейки имел внутренний диаметр, равный 90 мм, высоту – 50 мм.

Измеренные значения добротности и электрической емкости измерительной ячейки (пустой и заполненной водой или керосином) равны: для пустой ячейки – добротность 130, емкость – 132,7 пФ; для заполненной водой соответственно 40 и 11,7; для заполненной керосином соответственно 125 и 130,2 пФ.

В работе использовался портландцемент производства ОАО «Искитимцемент» (Новосибирская область) марки ПЦ 400 Д 20. Его минералогический состав, мас. %: C_3S – 55; C_2S – 18; C_3A – 11; C_4AF – 14. Удельная поверхность цемента – 320 м²/кг, химический состав, мас. %: SiO_2 – 20,81; Al_2O_3 – 6,9; Fe_2O_3 – 4,6; CaO – 65,5; MgO – 1,3; SO_3 – 0,4; п.п.п. – 0,5.

Все исследованные концентрированные суспензии имели консистенцию, соответствующую принятому в технологии строительных материалов понятию «теста нормальной густоты». Для системы цемент-вода отношение жидкость/твердое тело составляло Ж/Т = 0,28–0,37.

Для сравнения с водой (сильно полярной жидкостью ($\epsilon = 81$)) исследована суспензия цемента в керосине, который представляет собой смесь углеводородов (преимущественно $C_9 - C_{16}$), т.е. является типичной неполярной жидкостью ($\epsilon = 2,0-2,2$) [11].

При взаимодействии цемента с водой активно развиваются процессы адсорбции и гидратации. Наряду с цементом аналогичные исследования проведены с волластонитом. Волластонит – однокальциевый силикат ($CaO \cdot SiO_2$), близкий по составу

к основным клинкерным минералам – трехкальциевому силикату кальция $3CaO \cdot SiO_2$ и двухкальциевому силикату кальция $2CaO \cdot SiO_2$, он обладает малой гидравлической активностью.

В работе исследован волластонит Алтайского месторождения (рудник «Веселый»). Его химический состав, мас. %: SiO_2 – 53,4; CaO – 34,7; MgO – 0,3; Al_2O_3 – 3,1; Fe_2O_3 – 2,3; п.п.п. – 0,2. Дисперсность волластонита определена методом лазерной гранулометрии на приборе PRO-7000 Sieshin Enterprises Co. LTD, Токуо. Средний размер зерен волластонита 50 мкм.

В связи с высокой дисперсностью волластонита при получении суспензии, соответствующей по консистенции цементному тесту нормальной густоты,

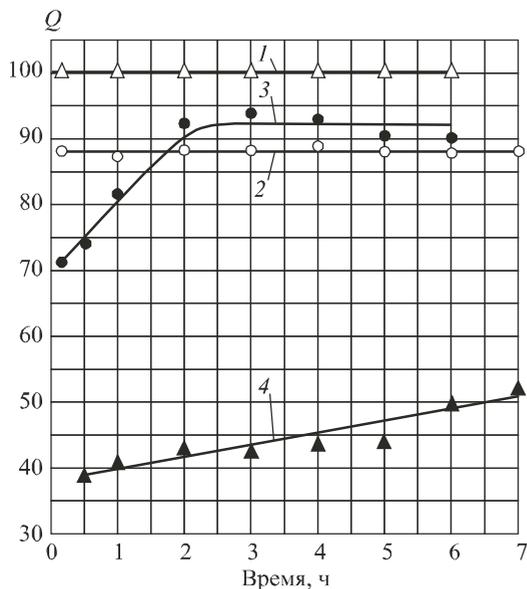


Рис. 2. Добротность измерительной ячейки с различными суспензиями через разное время от начала затворения

1 – волластонит-керосин; 2 – цемент-керосин; 3 – цемент-вода; 4 – волластонит-вода

отношение жидкость/твердое тело (Ж/Т) составляло при затворении водой 0,8, при использовании керосина – 1,0.

Исследована начальная стадия взаимодействия цемента с водой. Измерения производились при + 20 °С в течение 7 ч: в течение первого часа через 30 мин, а затем – через 1 ч. Опыты проводили следующим образом: определяли емкость C_1 и добротность пустой ячейки Q_1 , измеряли параметры C_2 и Q_2 ячеек, заполненных суспензией цемента или волластонита с водой и керосином с выбранным соотношением Ж/Т. Обобщенные результаты измерений приведены на рис. 2, 3.

Наиболее активное взаимодействие в системе цемент-вода происходит в начальный период (до 60–120 мин) затворения смеси с последующим монотонным ходом протекающих процессов гидратации во времени, что явно обнаруживается по характерной зависимости диэлектрических потерь цементно-водной суспензии в течение 6 ч. В начальный период после затворения системы диэлектрические потери заметно уменьшаются (на 30 %), а в дальнейшем с увеличением времени их изменение практически отсутствует (см. рис. 2, кривая 3).

Подтверждающим фактом взаимосвязи диэлектрических характеристик с протекающими процессами в исследуемой системе является то, что при замене в суспензии воды (полярной жидкости) на керосин (неполярную жидкость) изменения диэлектрических характеристик во времени не происходит (см. рис. 2, кривые 1 и 2), поскольку в системе цемент-керосин отсутствуют гидратационные процессы.

Для высокодисперсного природного силиката кальция (волластонита) имеют место процессы гидратации и адсорбции при затворении его водой, что выявляется по линейному увеличению диэлектрической добротности (на 25 %) исследуемой системы с течением времени (7 ч), при этом степень их проявления слабее, чем в системе цемент-вода.

Следует отметить важную особенность изменения электрической добротности при замене в исследуемых системах воды на керосин. Для волластонита такая замена жидкости сопровождается резким (в 2,5 раза) увеличением добротности (диэлектрические потери уменьшаются (см. рис. 2, кривые 1 и 4)), что согласуется с диэлектрической природой полярных и неполярных молекул. В то же время аналогичная замена жидкости в суспензиях цемента вызывает в начальный период меньшее увеличение добротности, а по истечении 2–3 ч значения добротности систем цемент-вода и цемент-керосин близки друг другу.

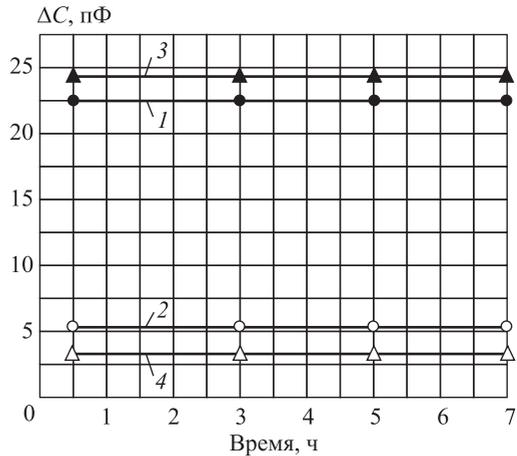


Рис. 3. Изменение емкости измерительной ячейки (ΔC , пФ) с различными суспензиями через разное время от начала затворения 1 – цемент-вода; 2 – цемент-керосин; 3 – волластонит-вода; 4 – волластонит-керосин

Наблюдаемое различие в изменении электрической добротности систем с разными силикатами кальция при замене жидкости указывает на различную степень проявления процессов адсорбции и гидратации исследуемых минералов.

Диэлектрический показатель – изменение электрической емкости суспензий – свидетельствует, что для систем цемент-вода и волластонит-вода изменение емкости существенно больше, чем для систем с неполярной жидкостью – керосином (см. рис. 3, кривые 1 и 3). Это связано с основным вкладом полярных молекул воды в значение электрической емкости суспензий. Для систем с неполярной жидкостью (керосином) изменение электрической емкости суспензий незначительно (см. рис. 3, кривые 2 и 4).

Необходимо отметить, что при измерениях в течение 7 ч (см. рис. 3) процессы адсорбции и гидратации, протекающие в исследуемых водных системах, не влияют на изменение электрической емкости.

Изменение добротности во времени (см. рис. 2) систем цемент-вода и волластонит-вода обусловлено тем, что состояние воды последовательно изменяется от свободного к сорбционному и химически связанному с минералами силикатов кальция. Диэлектрические потери вызваны в данном случае, главным образом, двумя факторами – электрической проводимостью и ориентацией диполей в электрическом поле высокой частоты. При высоких частотах последний фактор рассматривается в случае твердых тел как доминирующий [7, 12–14].

Способность к ориентации диполей (полярных молекул воды или гидроксильных групп OH^-) в высокочастотном поле зависит от степени их связи в структуре твердого тела. По мере вовлечения молекул воды в химическое взаимодействие и образования кристаллогидратов эта связь усиливается, что неизбежно вызывает уменьшение $\text{tg}\delta$ (увеличение добротности Q).

Аналогичные изменения свойств воды – значительное уменьшение диэлектрических потерь при некотором увеличении диэлектрической проницаемости – происходят при понижении температуры. Так, в работе [6] приведены следующие свойства воды: на частоте 10^6 Гц (1 МГц): при температуре 25°C – $\varepsilon = 78,2$, $\text{tg}\delta = 0,04$; при температуре $1,5^\circ\text{C}$ – $\varepsilon = 87$, $\text{tg}\delta = 0,019$, т.е. при понижении температуры вклад полярных молекул воды в значение диэлектрической проницаемости несколько возрастает, а по отношению диэлектрических потерь резко снижается.

Отмеченное изменение свойств воды на начальных стадиях взаимодействия с цементом (первые несколько часов после затворения цемента) может быть причиной известного явления, называемого «индукционным периодом», когда гидратация замедляется.

Химическое взаимодействие полярных молекул воды и клинкерных минералов обуславливает снижение их участия в механизме диэлектрических потерь. Уровень диэлектрических свойств (добротность системы) служит индикатором такого взаимодействия. По их значениям можно оценить влияние добавок (дисперсных минералов, электролитов, поверхностно-активных веществ) и технологических факторов на свойства гидратирующейся системы цемент-вода и определить их оптимальный уровень [15].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецова Т.В., Кудряшов И.В., Тимашев В.В. Физическая химия вяжущих материалов. М.: Высш. шк., 1989. 384 с.
2. Haddad R.H., Al-Qadi J.L. Characterization of Portland cement concrete using electromagnetic waves over the microwave frequencies // Cement and Concrete Research. 1998. Vol. 28, No. 10. P. 1379–1391.
3. Заринский В.А. Диэлькометрия // Хим. энцикл. Т. 2. М.: Сов. энцикл., 1990. С. 210.
4. Заринский В.А., Ермаков В.И. Высокочастотный химический анализ. М.: Наука, 1970. 200 с.
5. Будников П.П., Балкевич В.Л., Бережной А.С. и др. Химическая технология керамики и огнеупоров. М.: Стройиздат, 1972. 552 с.
6. Хиппель А.Р. Диэлектрики и их применение. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. 336 с.
7. Водопьянов К.А. Температурно-частотная зависимость угла диэлектрических потерь в кристаллах с полярными молекулами // Докл. АН СССР. 1952. Т. 94, № 5. С. 919–921.
8. Бердов Г.И., Виноградов С.А., Машкин А.Н., Хританков В.Ф. Диэлькометрический анализ влияния раствора электролита на свойства цементных материалов // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 8. С. 21–24.
9. Бердов Г.И., Машкин А.Н., Виноградов С.А. Высокочастотный диэлькометрический контроль процесса твердения цементных материалов // Строит. материалы. 2016. № 1–2. С. 28–30.
10. Ахвердов И.Н., Ковалев Ф.Я. Теоретические основы электропроводности бетона // ДАН БССР. 1964. Т. 8, № 7. С. 447–451.
11. Физические величины: Справ. / А.П. Бабичев и др. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
12. Сканава Г.И. Физика диэлектриков (Область слабых полей). М.; Л.: Гостехтеориздат, 1949. 500 с.
13. Водопьянов К.А., Галибина Г.И. Диэлектрические потери в кристаллах на высокой частоте // Изв. Том. политехн. ин-та. 1956. Т. 91. С. 269–276.
14. Тонконогов М.П. Диэлектрические потери в медном купоросе при высокой частоте // Изв. Том. политехн. ин-та. 1956. Т. 91. С. 287–292.
15. Salem Th.M. Electrical conductivity and rheological properties of ordinary Portland cement–silica fume and calcium hydroxide–silica fume pastes // Cement and Concrete Research. 2002. Vol. 32, No. 9. P. 1473–1481.

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

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Бернацкий Анатолий Филиппович, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: bernatsky@sibstrin.ru

Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств

Плетнев Петр Михайлович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: pletnevpm@stu.ru

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Хританков Владимир Федорович, д-р техн. наук; E-mail: vkhr tankov@mail.ru

Новосибирский государственный аграрный университет

Виноградов Семен Алексеевич, асп.; E-mail: semenvinogradov@yandex.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Семикин Павел Владимирович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: litodano@mail.ru
Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств

Получено 17.04.17

Berdov Gennadiy P'ich, DSc, Professor

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

Bernatskiy Anatoliy Filippovich, DSc, Professor

Novosibirsk State University of Architecture, Design and Art, Russia

Pletnev Petr Mikhaylovich, DSc, Professor

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Khritankov Vladimir Fedorovich, DSc

Novosibirsk State Agrarian University, Russia

Vinogradov Semen Alekseevich, Post-graduate Student

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

Semikin Pavel Vladimirovich, PhD, Ass. Professor

Novosibirsk State University of Architecture, Design and Art, Russia

INVESTIGATION OF PORTLAND CEMENT WITH WATER USING THE METHOD OF HIGH-FREQUENCY DIELECTRIC MEASUREMENT

In spite of numerous investigations in the field of cement material-technology, a lot of experimental facts did not find proper explanation due to complexity of physical-chemical process going on in the system of cement-water. Indices of dielectric losses permittivity, measured after mixing of cement with water, can give important information both of process going on in the system of cement-water with additions and of structural state of cement stone, that will make it possible to improve compositions and technology of building materials production on the cement basis. Experiment showed interrelation between change of dielectric losses (high quality) and proceeding processes of adsorption and hydration when mixing of cement and vollastonit with water, that is connected with consequent change of water state from free to sorbed and chemically linked. Such interrelation between structural sensitive dielectric characteristics of water cement suspensions and proceeding processes makes it possible to consider dielectrometry as a highly informative method of analysis when choosing of different additions and improvement of technological regimes of cement materials production.

Key words: portland cement, cement stone, dielectrometry, dielectric properties, structure.

REFERENCES

1. Kuznetsova T.V., Kudryashov I.V., Timashev V.V. Fizicheskaya khimiya vyazhushchikh materialov [Physical chemistry of viscous materials]. Moscow, 1989. 384 p. (in Russian)
2. Haddad R.H., Al-Qadi J.L. Characterization of Portland cement concrete using electromagnetic waves over the microwave frequencies. Cement and Concrete Research. 1998. Vol. 28, No. 10. Pp. 1379–1391.
3. Zarinskiy V.A. Diel'kometriya. Khimicheskaya entsiklopediya. T. 2 [Dielectrometry. Chemical encyclopaedia. Vol. 2]. Moscow, 1990. P. 210. (in Russian)
4. Zarinskiy V.A., Ermakov V.I. Vysokochastotnyy khimicheskiy analiz [High-frequency chemical analysis]. Moscow, 1970. 200 p. (in Russian)

5. Budnikov P.P., Balkevich V.L., Berezhnoy A.S. et al. *Khimicheskaya tekhnologiya keramiki i ogneporov* [Chemical technology of ceramics and refractories]. Moscow, Stroyizdat, 1972. 552 p. (in Russian)
6. Khippel' A.R. *Dielektriki i ikh primeneniye* [Dielectrics and their usage]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat, 1959. 336 p. (in Russian)
7. Vodop'yanov K.A. *Temperaturno-chastotnaya zavisimost' ugla dielektricheskikh poter' v kristallakh s polyarnymi molekulami* [Temperature-frequency dependence of the angle dielectric losses in crystals with polar molecules]. *Doklady AN SSSR* [Reports of the Academy of Sciences USSR]. 1952. Vol. 94, No. 5. Pp. 919–921. (in Russian)
8. Berdov G.I., Vinogradov S.A., Mashkin A.N., Khritankov V.F. *Diel'kometricheskii analiz vliyaniya rastvora elektrolita na svoystva tsementnykh materialov* [Dielectric analysis of influence electrolyte solution on the properties of cement materials]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No. 8. Pp. 21–24. (in Russian)
9. Berdov G.I., Mashkin A.N., Vinogradov S.A. *Vysokochastotnyy diel'kometricheskii kontrol' protsessa tverdeniya tsementnykh materialov* [High-frequency dielectric measurement control of the process of cement stone hardening]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials]. 2016. No. 1–2. Pp. 28–30. (in Russian)
10. Akhverdov I.N., Kovalev F.Ya. *Teoreticheskie osnovy elektroprovodnosti betona* [Theoretical fundamentals of electrical conductivity of concrete]. *Doklady AN BSSR* [Reports of the Academy of Sciences BSSR]. 1964. Vol. 8, No. 7. Pp. 447–451. (in Russian)
11. *Fizicheskie velichiny* [Physical magnitude]. Moscow, Energoatomizdat, 1991. 1232 p. (in Russian)
12. Skanavi G.I. *Fizika dielektrikov (Oblast' slabyykh poley)* [Physics of dielectrics (Sphere of weak fields)]. Moscow, Leningrad, 1949. 500 p. (in Russian)
13. Vodop'yanov K.A., Galibina G.I. *Dielektricheskie poteri v kristallakh na vysokoy chastote* [Dielectric losses in crystals on high frequency]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta*. 1956. Vol. 91. Pp. 269–276. (in Russian)
14. Tonkonogov M.P. *Dielektricheskie poteri v mednom kuporose pri vysokoy chastote* [Dielectric losses in blue vitriol under high frequency]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta*. 1956. Vol. 91. Pp. 287–292. (in Russian)
15. Salem Th.M. *Electrical conductivity and rheological properties of ordinary Portland cement-silica fume and calcium hydroxide-silica fume pastes*. *Cement and Concrete Research*. 2002. Vol. 32, No. 9. Pp. 1473–1481.

УДК 691.699.86

В.П. СЕЛЯЕВ, Л.И. КУПРИЯШКИНА, Н.Н. КИСЕЛЕВ, П.В. СЕЛЯЕВ

**ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА НАПОЛНИТЕЛЯ
ВАКУУМНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОЙ ПАНЕЛИ
НА ОСНОВЕ ПИРОГЕННОГО МИКРОКРЕМНЕЗЕМА**

Предложена возможность получения энергоэффективных вакуумных теплоизоляционных панелей. Методом анализа аналитических зависимостей после реализации полиномиальных моделей Кифера–Коно подобран наилучший состав наполнителя вакуумной теплоизоляционной панели. Показаны возможности применения в технологии изготовления VIP пирогенного микрокремнезема. Оценка качества VIP производилась по показателям коэффициента теплопроводности и прочности при сжатии. Оптимизирован состав наполнителя панели типа VIP по теплопроводности с учетом изменения показателя прочности. Приведено сравнение характеристик вакуумной порошковой теплоизоляции с традиционно применяемыми теплоизоляционными материалами.

К л ю ч е в ы е с л о в а: вакуум, изоляционная панель, пирогенный микрокремнезем, коэффициент теплопроводности, прочность при сжатии, деформация, наполнитель, оболочка.

Разработка энергоэффективных систем теплоизоляции является актуальной задачей, успешное решение которой зависит от наличия новых защитных материалов, конструктивных и технологических решений. В зарубежной практике проектирования зданий: низкого энергопотребления ($80\text{--}90 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ за отопительный период), ультранизкого энергопотребления ($35\text{--}40 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$), пассивных (менее $15 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$), энергонезависимых ($0 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$), энергоактивных, широкое применение находят вакуумные теплоизоляционные панели (VIP) [1–3].

Материал наполнителя вакуумной порошковой теплоизоляции должен иметь поровую структуру наноразмерного уровня для сохранения теплозащитных свойств при повышении давления до определенного уровня, обеспечивать формоустойчивость изделия под действием атмосферного давления и внешних нагрузок, являться хорошим абсорбентом для поглощения проникших внутрь панели паров воды [1–7]. Этим требованиям соответствуют силикагели, белая сажа, алюминиевая и бронзовая пудры, модифицированные диатомит и микрокремнезем. В качестве армирующего элемента можно использовать отходы ткацкого производства [8], минеральные волокна [6, 7, 9–11]. Добавки-блокираторы лучистой энергии применяются в виде порошков из материалов с низкой степенью черноты (диоксид титана, карбид кремния и др.). Ко всем компонентам предъявляется требование сохранения инертности в среде вакуума.

Задачей исследования является изучение возможности применения в технологии изготовления VIP пирогенного микрокремнезема марки

«Орисил-300». Оценка качества VIP производилась по показателям коэффициента теплопроводности и прочности при сжатии, а также путем сопоставления с лучшими аналогами.

В данном исследовании в качестве компонентов наполнителя применялись:

- пирогенный микрокремнезем марки «Орисил-300»;
- диоксид титана;
- стекловолокно.

Для испытаний были изготовлены образцы вакуумных теплоизоляционных панелей размером 100×100×10 мм с плотностью 170 кг/м³. Оболочка образцов представляет собой сваренный с трех сторон термической сваркой герметичный пакет из двухслойного пластика (PET/PE). Необходимость применения такого пакета объясняется желанием исключить влияние тепловых мостов на теплотехнические характеристики образцов, создаваемых слоем металлической фольги, традиционно используемой в оболочках, коммерчески реализуемой вакуумной теплоизоляции.

Аналитические зависимости, описывающие влияние количественного соотношения компонентов наполнителей на механические и теплотехнические характеристики вакуумных панелей, рассматривали на основе полиномиальных моделей Кифера–Коно. Полученные зависимости позволяют выбрать наилучший состав, исходя из прочности на сжатие при 10%-й деформации и коэффициента теплопроводности.

Общий вид полиномиальных моделей представлен уравнением регрессии второго порядка

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2.$$

В качестве варьируемых факторов в эксперименте были приняты:

X_1 – отношение количества диоксида титана к количеству пирогенного микрокремнезема;

X_2 – отношение количества минерального волокна к количеству пирогенного микрокремнезема.

Матрица планирования эксперимента приведена в табл. 1.

Двухфакторный план эксперимента представлен в табл. 2. При реализации эксперимента в качестве выходного параметра контролировались: Y_1 – прочность на сжатие при 10%-й деформации; Y_2 – коэффициент теплопроводности. После обработки экспериментальных данных были получены графические зависимости изменения прочности при сжатии и коэффициента теплопроводности образцов от количественного содержания порошкообразного наполнителя и волокон.

Таблица 1. Матрица планирования эксперимента

x_i	x_1	x_2	x_1^2	x_2^2	x_1x_2
1	-1	-1	1	1	1
1	0	-1	0	1	0
1	1	-1	1	1	-1
1	-1	0	1	0	0
1	0	0	0	0	0
1	1	0	1	0	0
1	-1	1	1	1	-1
1	0	1	0	1	0
1	1	1	1	1	1

Т а б л и ц а 2. Двухфакторный план эксперимента

Номер точек плана	В нормализованных факторах		В натуральных факторах		Выходные параметры	
	X_1 – диоксид титана/орисил (по массе)	X_2 – минеральное волокно/орисил (по массе)	X_1	X_2	Y_1 (прочность при сжатии)	Y_2 (теплопроводность)
1	-1	-1	10	7,5	0,196	0,00660
2	0	-1	20	7,5	0,182	0,00600
3	1	-1	30	7,5	0,206	0,00567
4	-1	0	10	10	0,217	0,00750
5	0	0	20	10	0,223	0,00487
6	1	0	30	10	0,214	0,00490
7	-1	1	10	12,5	0,185	0,00750
8	0	1	20	12,5	0,191	0,00480
9	1	1	30	12,5	0,181	0,00490

Математический анализ результатов эксперимента выявил следующие зависимости:

коэффициент теплопроводности –

$$Y_2 = 0,005 - 0,001X_1 + 0,001X_1^2; \quad (1)$$

прочность при сжатии при 10%-й деформации –

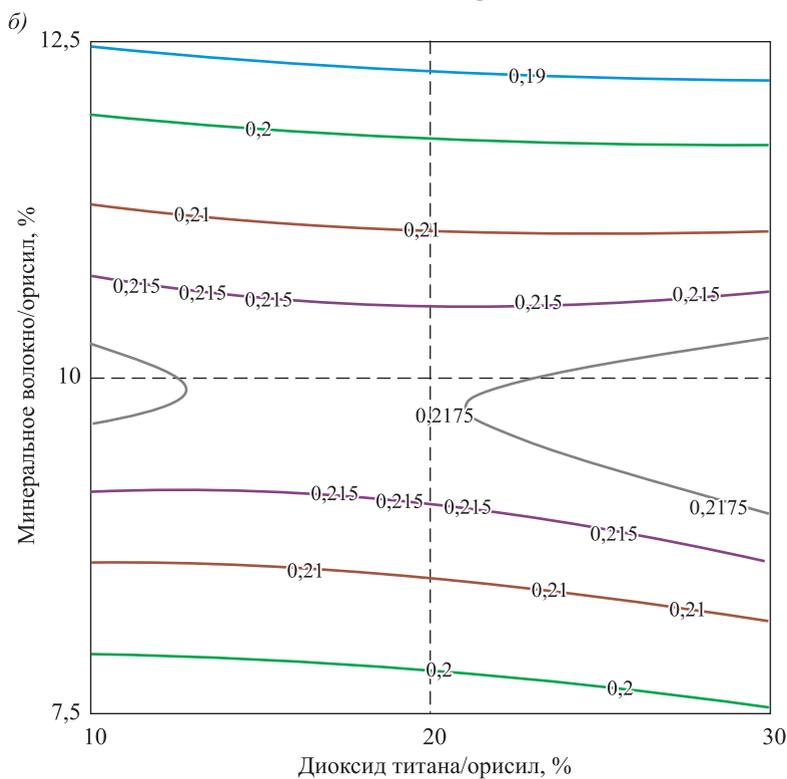
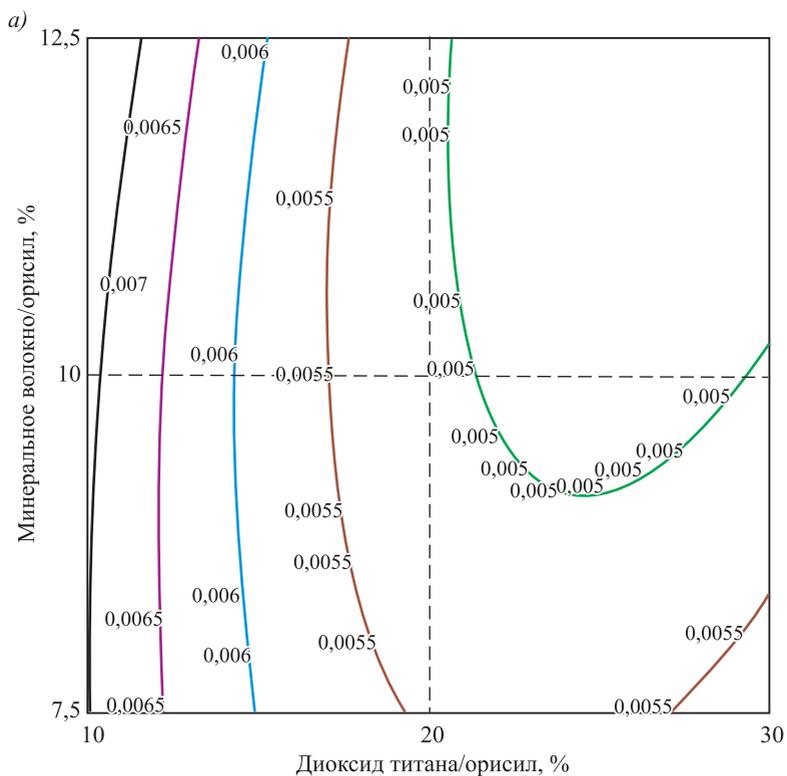
$$Y_1 = 0,217 - 0,005X_2 + 0,001X_1^2 - 0,003X_1X_2 - 0,028X_2^2. \quad (2)$$

Геометрическая интерпретация функциональных зависимостей (1) и (2) представлена на рисунке.

На основании полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что оптимальное значение коэффициента теплопроводности достигается при содержании диоксида титана от 22 до 30 % и минерального волокна от 9 до 12,5 % от массы пирогенного микрокремнезема.

Анализируя графические зависимости, можно утверждать, что содержание диоксида титана в наполнителе в пределах 10–30 % от массы пирогенного микрокремнезема практически не оказывает влияния на прочность при сжатии вакуумной порошковой теплоизоляционной панели. Оптимальное содержание минерального волокна составляет 9–11 % от массы пирогенного микрокремнезема.

Установлено, что применение микрокремнезема Орисил-300 даст возможность улучшить теплотехнические и прочностные характеристики вакуумных теплоизоляционных панелей и превзойти по показателям качества известные аналоги (табл. 3). Поэтому пирогенный микрокремнезем Орисил-300 можно использовать для организации производства теплоизоляционных материалов нового поколения.



Графическая зависимость коэффициента теплопроводности (a) и прочности при сжатии при 10%-й деформации (б) в зависимости от состава наполнителя вакуумной теплоизоляции

Таблица 3. Сравнение характеристик вакуумной порошковой теплоизоляции с традиционно широко применяемыми теплоизоляционными материалами

Показатель	Прочность при сжатии при 10%-й относительной деформации, КПа	Коэффициент теплопроводности
Экструзионный пенополистирол технониколь carbon есо	250	0,029
Rockwool фасад батсс	45	0,046
Rockwool вентн батсс	15	0,037
Пенополистирол ПСБ-С 15	50	0,043
Пенополистирол ПСБ-С 25	100	0,042
Пенополистирол ПСБ-С 35	160	0,038
Вакуумная теплоизоляционная панель на основе белой сажи (плотность 270 кг/м ³)	240–260	0,01–0,02
Вакуумная теплоизоляционная панель на основе пирогенного микрокремнезема (плотность 170 кг/м ³)	190–220	0,004–0,007

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Caps R., Friscke J. Konzepte für den Einsatz, von evakuierten Dämmungen bei Passivhäusern. 4 Passivhaus Tagung, Kassel, Marz. 2000. P. 171–177.
2. Дульнев Г.Н., Сигалова Г.В. Теплопроводность моно- и полидисперсных зернистых материалов // Строительная теплофизика. М.; Л.: Энергия, 1966. С. 40–47.
3. Kumaran K. Heat, air and moisture transfer in insulated envelope parts. IEA Final Report Vol. 3. Task 3: Material Properties 1996. P. 146–154.
4. Caps R., Hetfleisch J., Rettelbach Th., Fricke J. Thermal conductivity of spun glass fibers as filler material for vacuum insulations, Thermal Coductivity 23, 1966. P. 373–382.
5. Schwab H., Wachtel J., Heinemann U., Beck A., Fricke J. Vakuumisolationspaneele unter baupraktischen Bedingungen. 1. Conference VIP-Bau', proceedings, Rostock-Warnemi'mde, 2003. P. 68–76.
6. Селяев В.П., Осипов А.К., Куприяшкина Л.И., Седова А.А., Кечуткина Е.Л., Супонина Л.А. Возможность создания теплоизоляционных материалов на основе наноструктурированного микрокремнезема из диатомита // Наука: 21 век. 2011. № 3(15). С. 76–86.
7. Селяев В.П., Неверов В.А., Осипов А.К., Куприяшкина Л.И. Теплоизоляционные материалы и изделия на основе вакуумированных дисперсных порошков микрокремнезема и диатомита: моногр. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013. 220 с.
8. Селяев В.П., Данилов А.М., Селяев П.В., Киселев Н.Н., Маштаев О.Г., Кечуткина Е.Л. Возможность применения хлопкового волокна для производства вакуумных теплоизоляционных панелей // Технология текстильной промышленности. 2017. № 1. С. 112–118.
9. Данилевский Л.Н. Вакуумная теплоизоляция и перспективы ее использования в строительстве // Архитектура и строительство. 2006. № 5. С. 114–117.

10. Oehler S. Münsterländer Hof renoviert. 9 Internationale Passivhaustagung 2006. Hannover, 2006. P. 57–62.
11. Diefernbach N. Modernisierung von Zweifamilienhäusern auf unterschiedliche energetische Standards unter einatz von Großelementen mit Vakuumdämmung. 9 Internationale Passivhaustagung 2006. Hannover, 2006. P. 63–68.

Селяев Владимир Павлович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: ntorm80@mail.ru

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

Куприяшкина Людмила Ивановна, канд. техн. наук, проф.;

E-mail: kupriashkina.lyudmila@yandex.ru

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

Киселев Николай Николаевич, асп.

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

Селяев Павел Владимирович, канд. техн. наук, доц.

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

Получено 14.04.17

Selyaev Vladimir Pavlovich, Academician of RAACS, DSc, Professor;

E-mail: ntorm80@mail.ru

Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

Kupriyashkina Lyudmila Ivanovna, PhD, Professor;

Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

Kiselev Nikolay Nikolaevich, Post-graduate Student

Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

Selyaev Pavel Vladimirovich, PhD, Ass. Professor;

Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF THE FILLER OF A VACUUM INSULATION PANEL BASED ON PYROGENIC MIKROSILICHESKOY

The possibility of obtaining energy-efficient systems based on vacuum insulating panels is proposed. Method of analysis analytical dependences after the implementation of polynomial models, the Kiefer–Kono picked up the best filler for vacuum insulating panels. The possibilities of application in the technology of making VIP pyrogenic microsilica of the are shown. The evaluation of the VIP quality was made on the basis of the coefficients of thermal conductivity and compressive strength. Optimized the composition of the filler panel type VIP for thermal conductivity, taking into account the change in the index of strength. Are shown comparison of characteristics of vacuum powder thermal insulation with traditionally applied heat-insulating materials.

Key words: vacuum, insulating panel, pyrogenic microsilica, thermal conductivity coefficient, compressive strength, deformation, filler, shell.

REFERENCES

1. Caps R., Friske J. Konzepte für den Einsatz, von evakuierten Dämmungen bei Passivhäusern. 4 Passivhaus Tagung, Kassel, Marz. 2000. Pp. 171–177.

2. Dul'nev G.N., Sigalova G.V. Teploprovodnost' mono- i polidispersnykh zernistykh materialov [Thermal conductivity of mono- and polydisperse granular materials]. Stroitel'naya teplofizika [Building thermophysics]. Moscow, Leningrad, 1966. Pp. 40–47. (in Russian)
3. Kumaran K. Heat, air and moisture transfer in insulated envelope parts. IEA Final Report Vol. 3. Task 3: Material Properties 1996. Pp. 146–154.
4. Caps R., Hetfleisch J., Rettelbach Th., Fricke J. Thermal conductivity of spun glass fibers as filler material for vacuum insulations, Thermal Conductivity 23, 1966. Pp. 373–382.
5. Schwab H., Wachtel J., Heinemann U., Beck A., Fricke J. Vakuumisolationspaneele unter baupraktischen Bedingungen. 1. Conference VIP-Bau', proceedings, Rostock-Warnemi'mde, 2003. Pp. 68–76.
6. Selyaev V.P., Osipov A.K., Kupriyashkina L.I., Sedova A.A., Kechutkina E.L., Suponina L.A. Vozmozhnost' sozdaniya teploizolyatsionnykh materialov na osnove nanostrukturirovannogo mikrokremnezema iz diatomita [Possibility of creation of heat-insulating materials on the basis of nanostructured microsilica from diatomite]. Nauka: 21 vek [Science. XXI center]. 2011. No. 3(15). Pp. 76–86. (in Russian)
7. Selyaev V.P., Neverov V.A., Osipov A.K., Kupriyashkina L.I. Teploizolyatsionnye materialy i izdeliya na osnove vakuumirovannykh dispersnykh poroshkov mikrokremnezema i diatomita [Heat-insulating materials and products on the basis of vacuum-dispersed microsilica and diatomite powders]. Saransk, 2013. 220 p. (in Russian)
8. Selyaev V.P., Danilov A.M., Selyaev P.V., Kiselev N.N., Mashtayev O.G., Kechutkina E.L. Vozmozhnost' primeneniya khlopkovogo volokna dlya proizvodstva vakuumnykh teploizolyatsionnykh paneley [The possibility of using cotton fiber for the production of vacuum insulation panels]. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti [Technology of textile industry]. 2017. No. 1. Pp. 112–118. (in Russian)
9. Danilevskiy L.N. Vakuumnaya teploizolyatsiya i perspektivy ee ispol'zovaniya v stroitel'stve [Vacuum heat insulation and the prospects for its use in construction]. Arkhitektura i stroitel'stvo [Architecture and construction]. 2006. No. 5. Pp. 114–117. (in Russian)
10. Oehler S. Münsterländer Hof renoviert. 9 Internationale Passivhaustagung 2006. Hannover, 2006. Pp. 57–62.
11. Diefernbach N. Modernisierung von Zweifamilienhäusern auf unterschiedliche energetische Standards unter einatz von Großelementen mit Vakuumdämmung. 9 Internationale Passivhaustagung 2006. Hannover, 2006. Pp. 63–68.

УДК 691.699.86

В.И. ЛОГАНИНА, С.Н. КИСЛИЦЫНА, М.В. ФРОЛОВ

**АКТИВНОСТЬ ВЫСОКОПОРИСТЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ
ДЛЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ СУХИХ
СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ**

Оценена эффективность использования в качестве высокопористых наполнителей в составе теплоизоляционной известковой сухой строительной смеси четырех материалов: стеклянных полых микросфер, зольных микросфер алюмосиликатных, вспученного вермикулитового песка, вспученного перлитового песка. Определена пуццоланическая активность исследуемых наполнителей. Выявлено, что на поверхности стеклянных полых микросфер в ходе реакции с известью образуются новообразования – гидросиликаты кальция. Подтверждена высокая эффективность применения полых стеклянных микросфер в качестве наполнителя в теплоизоляционных штукатурных растворах.

К л ю ч е в ы е с л о в а: сухие строительные смеси, пуццоланическая активность, гидросиликаты кальция, стеклянные полые микросферы, удельная прочность.

Для повышения эксплуатационных свойств известковых сухих строительных смесей (ССС) в их состав вводят различные модифицирующие добавки [1–3]. Пуццоланическая активность является одной из характеристик, позволяющих оценивать эффективность их использования в составе ССС [4]. Действие пуццоланического эффекта модифицирующих добавок в известковых ССС проявляется в химическом взаимодействии аморфного кремнезема, содержащегося в добавках, с известью. Следует отметить, что аморфный кремнезем может содержаться не только в модифицирующих добавках, но и в других компонентах известковых ССС, например, в наполнителях. При использовании в составе известковых ССС наполнителей, обладающих высокой пуццоланической активностью, в композитах образуются низкоосновные гидросиликаты кальция, упрочняющие известковые композиты.

В работе оценивалась пуццоланическая активность четырех различных высокопористых наполнителей:

- стеклянных полых микросфер МС-В насыпной плотностью 130 кг/м³;
- зольных микросфер алюмосиликатных насыпной плотностью 400 кг/м³;
- вспученного перлитового песка марки М-150 насыпной плотностью 150 кг/м³;
- вспученного вермикулитового песка насыпной плотностью 150 кг/м³.

Оксидный состав используемых в работе высокопористых наполнителей приведен в табл. 1.

Данные наполнители использовали при разработке теплоизоляционной ССС следующего состава: известь-пушонка, модифицирующая добавка, белый цемент, молотые отходы производства газобетона, редиспергируемый порошок, пластифицирующая добавка, гидрофобизатор, легкий высокопористый наполнитель [5, 6].

Таблица 1. Оксидный состав высокопористых наполнителей, %

Наполнитель	SiO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	MgO	Fe _x O _y	K ₂ O	Пр.
Стекланные полые микросферы	73,0	26,5	0,2	0,0	0,2	0,0	0,1
Зольные микросферы алюмосиликатные	55,0	1,5	35,0	1,5	2,5	2,9	1,6
Вспученный перлитовый песок	73,9	0,0	13,2	0,0	0,8	4,9	7,2
Вспученный вермикулитовый песок	40,6	3,8	14,9	24,5	5,9	10,1	0,2

Метод определения пуццоланической активности наполнителей основан на способности аморфного кремнезема поглощать известь из известкового раствора, связывая ее в низкоосновные гидросиликаты кальция [7, 8]. Методика проведения эксперимента следующая. Исследуемый наполнитель высушивали до постоянной массы при температуре 100–105 °С. Затем материал измельчали в ступке до его прохождения через сито № 008. После этого 2 г наполнителя помещали в емкость, в которую затем добавляли 100 мл насыщенного раствора извести с концентрацией CaO 0,80–0,85 г/л. В ходе эксперимента емкость периодически взбалтывали. Через каждые 2 сут из емкости брали 50 мл раствора для титрования 0,05 N раствором соляной кислоты с индикатором метилоранж. После титрования в цилиндр добавляли 50 мл раствора извести с концентрацией CaO 0,80–0,85 г/л. Активность наполнителей определяли количеством Ca(OH)₂, которое поглотил 1 г наполнителя за 30 сут.

Высокая пуццоланическая активность стекланных полых микросфер, составляющая 313,0 мг/г (рис. 1), вызвана большим содержанием SiO₂

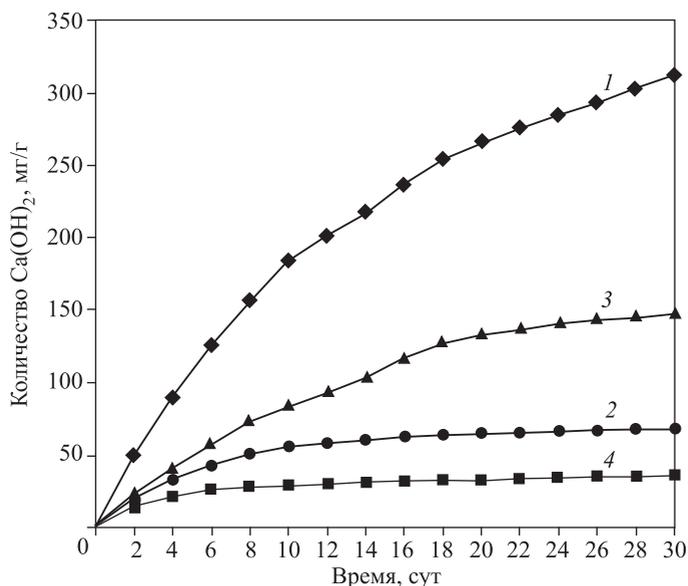


Рис. 1. Активность высокопористых наполнителей по поглощению Ca(OH)₂ из известкового раствора
 1 – стекланные полые микросферы; 2 – зольные микросферы алюмосиликатные; 3 – вспученный перлитовый песок; 4 – вспученный вермикулитовый песок

в данном наполнителе – 73,0 %, при этом значительная часть SiO_2 содержится в стенках микросфер в аморфном кремнеземе [9, 10]. Меньшая, чем у стеклянных полых микросфер, пуццоланическая активность зольных микросфер алюмосиликатных объясняется меньшим содержанием SiO_2 в данном наполнителе – 55,0 %. Вспученный перлитовый песок характеризуется довольно высокой пуццоланической активностью – 147,7 мг/г, что вызвано высоким содержанием в нем SiO_2 – 73,9 %. Низкая пуццоланическая активность вспученного вермикулитового песка объясняется меньшим, чем у других исследуемых наполнителей, содержанием SiO_2 – 40,6 %.

Эксперимент по определению пуццоланической активности стеклянных полых микросфер продолжали до тех пор, пока количество гидроксида кальция, поглощенного наполнителем, не перестало изменяться. Стеклянные полые микросферы продолжали активно поглощать $\text{Ca}(\text{OH})_2$ вплоть до 70 сут, затем скорость поглощения замедлилась и к 90 сут активность достигла 480,5 мг/г.

Сделаны электронно-микроскопические снимки стеклянных полых микросфер при помощи электронного микроскопа VEGA3 TESCAN до и после проведения эксперимента (рис. 2).

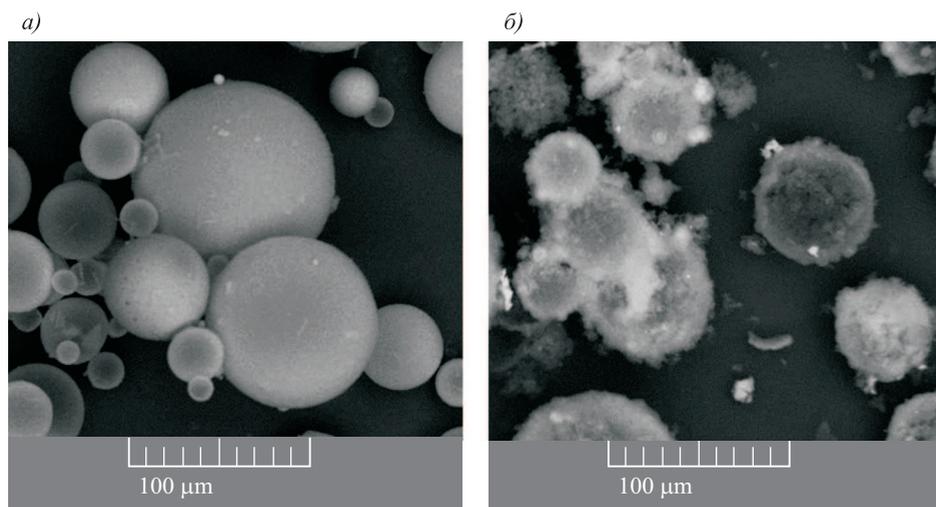


Рис. 2. Электронно-микроскопический снимок стеклянных полых микросфер до (а) и после (б) эксперимента по определению активности наполнителей

Стеклянные полые микросферы представляют собой замкнутые газонаполненные шарики разного диаметра, практически идеальной сферической формы, с четко выраженными границами. На снимке наполнителя, полученном после проведения эксперимента по определению пуццоланической активности, не наблюдается четкой границы у стеклянных микросфер. На поверхности шариков видны новообразования, предположительно представленные гидросиликатами кальция, образовавшимися в результате реакции гидроксида кальция и аморфного кремнезема, содержащегося в стенках микросфер.

Наполнение ССС высокопористыми наполнителями повышает теплоизоляционные свойства получаемого покрытия, но снижает его прочность. Для выбора наиболее эффективного наполнителя был проведен следующий эксперимент.

Изготавливались образцы покрытий размером 20×20×20 мм, высокопористые наполнители брались в количестве 40 % от массы извести. После 28 сут твердения в воздушно-сухих условиях определялась прочность при сжатии и средняя плотность растворных композитов. Затем вычислялась удельная прочность по формуле

$$R_{уд} = \frac{R_{сж}}{\rho_{ср}}, \text{ м}^2/\text{с}^2,$$

где $R_{уд}$ – удельная прочность, $\text{м}^2/\text{с}^2$;

$R_{сж}$ – прочность при сжатии, Па;

$\rho_{ср}$ – средняя плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Результаты исследований приведены в табл. 2.

Таблица 2. Свойства растворных композитов

Наполнитель	Средняя плотность $\rho_{ср}$, $\text{кг}/\text{м}^3$	Прочность при сжатии $R_{сж}$, МПа	Удельная прочность $R_{уд}$, $\text{м}^2/\text{с}^2$
Стекланные полые микросферы	600	3,30	5500
Зольные микросферы алюмосиликатные	860	4,25	4942
Вспученный перлитовый песок	800	2,97	3713
Вспученный вермикулитовый песок	660	2,10	3182

Композиты со стекланными полыми микросферами характеризуются наибольшей удельной прочностью $R_{уд} = 5500 \text{ м}^2/\text{с}^2$ по сравнению с композитами, наполненными другими высокопористыми наполнителями. Это можно объяснить высокой пуццолановой активностью данного наполнителя и отсутствием неравномерного распределения концентраций напряжений вокруг сферических частиц микросфер.

Более низкая прочность композитов, наполненных вспученным перлитовым и вермикулитовым песком, вызвана высокой влагоемкостью данных наполнителей и неравномерным распределением концентраций напряжений вокруг частиц наполнителей из-за их сложной неизометрической формы. При этом удельная прочность композитов, наполненных вспученным перлитовым песком, выше из-за высокой пуццолановой активности данного наполнителя по сравнению с вермикулитовым песком.

Приведенные в статье данные свидетельствуют о высокой эффективности применения полых стекланных микросфер в качестве высокопористого наполнителя в теплоизоляционных ССС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горегляд С.Ю. Использование модифицирующих добавок при производстве сухих строительных смесей // Строит. материалы. 2001. № 8. С. 28–29.

2. Логанина В.И., Кислицына С.Н., Фролов М.В. Известковое композиционное вяжущее с применением добавки на основе алюмосиликатного наполнителя // Вестн. Белгород. гос. ун-та им. В.Г. Шухова. 2015. № 6. С. 70–73.
3. Баталин Б.С. Исследования эффективности добавок, применяемых для производства сухих строительных смесей // Успехи современного естествознания. 2007. № 7. С. 60–62.
4. Халиуллин М.И., Рахимов Р.З., Гайфуллин А.Р. Пуццоланическая активность керамзитовой пыли и ее зависимость от удельной поверхности // Изв. КГАСУ. 2013. № 3. С. 98–104.
5. Логанина В.И., Фролов М.В. Эффективность применения теплоизоляционной штукатурки с применением микросфер для отделки газобетонной ограждающей конструкции // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 5. С. 55–62.
6. Логанина В.И., Фролов М.В., Рябов М.А. Теплоизоляционные известковые сухие строительные смеси для отделки стен из газобетона // Вестн. МГСУ. 2016. № 5. С. 82–92.
7. Бутт Ю.М., Тимашев В.В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов / под ред. Ю.М. Бутта. М.: Высш. шк., 1973. 504 с.
8. Зырянов М.С., Ахметжанов А.М., Манушина А.С., Потапова Е.Н. Определение пуццолановой активности метакаолина // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т. 30. № 7. С. 44–46.
9. Саградян А.А., Зимакова Г.А. Исследование пуццоланической активности зольных микросфер // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 2. С. 43–47.
10. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Полые микросферы – эффективный заполнитель для высокопрочных легких бетонов // Пром. и гражд. стр-во. 2013. № 10. С. 80–83.

Логанина Валентина Ивановна, д-р техн. наук, проф.; E-mail: loganin@mail.ru
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
Кислицына Светлана Николаевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: Kisl752@mail.ru
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
Фролов Михаил Владимирович, асп.; E-mail: mihail-frolovv@yandex.ru
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Получено 06.04.17

Loganina Valentina Ivanovna, DSc, Professor; E-mail: loganin@mail.ru
Penza State University of Architecture and Construction, Russia
Kislitsyna Svetlana Nikolaevna, PhD, Ass. Professor; E-mail: Kisl752@mail.ru
Penza State University of Architecture and Construction, Russia
Frolov Mikhail Vladimirovich, Post-graduate Student;
E-mail: mihail-frolovv@yandex.ru
Penza State University of Architecture and Construction, Russia

ACTIVITY OF HIGHLY PERFECT FILLERS FOR THERMAL INSULATING DRY BUILDING MIXTURES

The effectiveness of the use of four materials as a high-porosity filler in a heat-insulating calcareous dry mortar mix: glass hollow microspheres, ash microspheres of aluminosilicate, expanded vermiculite sand, expanded perlite sand. The pozzolanic activity of the test excipients was determined. It was revealed that on the surface of the glass hollow microspheres, the formation of the reaction with lime formed neoplasms –

calcium hydrosilicates. The high efficiency of using hollow glass microspheres as a filler in heat-insulating plaster solutions has been confirmed.

Key words: dry building mixtures, pozzolanic activity, calcium hydrosilicates, glass hollow microspheres, specific strength.

REFERENCES

1. Goreglyad S.Yu. Ispol'zovanie modifitsiruyushchikh dobavok pri proizvodstve sukhikh stroitel'nykh smesey [Use of modifying additives in the production of dry construction mixtures]. *Stroitel'nye materialy* [Building Materials]. 2001. No. 8. Pp. 28–29. (in Russian)
2. Loganina V.I., Kislitsyna S.N., Frolov M.V. Izvestkovoe kompozitsionnoe vyazhushchee s primeneniem dobavki na osnove alyumosilikatnogo napolnitelya [Lime composite binder with the use of an additive based on aluminosilicate filler]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Bulletin of the Belgorod State University Shukhov]. 2015. No. 6. Pp. 70–73. (in Russian)
3. Batalin B.S. Issledovaniya effektivnosti dobavok, primenyaemykh dlya proizvodstva sukhikh stroitel'nykh smesey [Investigations of the effectiveness of additives used for the production of dry construction mixtures]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Progress in Modern Natural Science]. 2007. No. 7. Pp. 60–62. (in Russian)
4. Khaliullin M.I., Rakhimov R.Z., Gayfullin A.R. Putstsolanicheskaya aktivnost' keramzitovoy pyli i ee zavisimost' ot udel'noy poverkhnosti [Pozzolanic activity of expanded clay dust and its dependence on the specific surface]. *Izvestiya KGASU* [News of the KSUAE]. 2013. No. 3. Pp. 98–104. (in Russian)
5. Loganina V.I., Frolov M.V. Effektivnost' primeneniya teploizolyatsionnoy shtukaturki s primeneniem mikrosfer dlya otdelki gazobetonnoy ograzhdayushchey konstruksii [Effectiveness of thermal insulation plaster with the use of microspheres for finishing aerated concrete walling]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 5. Pp. 55–62. (in Russian)
6. Loganina V.I., Frolov M.V., Ryabov M.A. Teploizolyatsionnye izvestkovye sukhie stroitel'nye smesi dlya otdelki sten iz gazobetona [Insulation lime dry mixes for the walls of aerated concrete]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016. No. 5. Pp. 82–92. (in Russian)
7. Butt Yu.M., Timashev V.V. Praktikum po khimicheskoy tekhnologii vyazhushchikh materialov [Workshop on the chemical technology of binders]. Moscow, 1973. 504 p. (in Russian)
8. Zyryanov M.S., Akhmetzhanov A.M., Manushina A.S., Potapova E.N. Opredelenie putstsolanovoy aktivnosti metakaolina [Determination of pozzolanic activity of metakaolin]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Progress in chemistry and chemical technology]. 2016. Vol. 30. No. 7. Pp. 44–46. (in Russian)
9. Sagradyan A.A., Zimakova G.A. Issledovanie putstsolanicheskoy aktivnosti zol'nykh mikrosfer [The study of the pozzolanic activity of hollow glass microspheres]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2012. No. 2. Pp. 43–47. (in Russian)
10. Inozemtsev A.S., Korolev E.V. Polye mikrosfery – effektivnyy zapolnitel' dlya vysokoprochnykh legkikh betonov [Hollow microspheres – an effective filler for high-strength lightweight concrete]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil construction]. 2013. No. 10. Pp. 80–83. (in Russian)

УДК 691.54:620.18

А.И. ГНЫРЯ, Ю.А. АБЗАЕВ, С.В. КОРОБКОВ, Д.И. МОКШИН,
К.С. ГАУСС, А.П. БОЯРИНЦЕВ**ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТВЕРДЕНИЯ
НА СТРУКТУРУ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ***

Методом Ритвельда исследовалось количественное содержание фаз в цементном камне в зависимости от времени изотермического твердения при температуре 40 °С. С высокой степенью надежности было установлено, что к основным фазам цементного камня относятся $\text{Ca}_6\text{H}_2\text{O}_{13}\text{Si}_3$, $\text{Ca}_3\text{HO}_9\text{Si}_3$. В указанных решетках учтено присутствие атомов водорода. Содержание фаз оценено по вкладу расчетных интенсивностей отдельных фаз в интегральную интенсивность, а также по величине массовой доли фаз. Показано, что решетки перечисленных фаз находятся в высокостабильном состоянии и с ростом времени твердения наблюдается тенденция к повышению энергии связи решеток.

Ключевые слова: цементный камень, метод Ритвельда, параметры решетки, кристаллическое строение, количественный фазовый анализ.

Введение. Цементный камень относится к многофазным материалам С–Н–S переменного состава. В разнообразных условиях внешнего воздействия, в частности гидратирования при повышенных температурах, в цементном камне обнаруживается вариация количественного состава цементного камня. В литературе, несмотря на сравнительно большое число работ, посвященных анализу структурных свойств разнообразных модификаций фаз С–Н–S переменного состава, как правило, не приводится полная структурная информация [1–12]. Прежде всего, отсутствуют координаты атомов в решетках, число атомов, размеры суперячеек, особенности и возможность пространственного перераспределения атомов в решетках исследуемых гидросиликатов. Практически не обращалось внимание на стабильность решеток разнообразных фаз С–Н–S, наблюдаемых в цементном камне. Представляется актуальным детальное изучение количественного содержания фаз цементного камня в процессе изотермического твердения при повышенных температурах с учетом стабильности решеток фаз, а также возможности вариации числа атомов в С–Н–S в условиях стабильности решеток при изотермическом твердении.

Цели настоящей работы – исследование структурного гидратированного состояния цементного камня на основе портландцемента различных состояний методом Ритвельда, определение количественного состава, массовой доли отдельных фаз, возможности перераспределения элементного содержания в цементном камне различных состояний при условии стабильности решеток, а также идентификация особенностей структурных параметров кристаллических фаз: параметров решеток, определение структурной информации фаз цементного камня при разных состояниях.

* Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для поддержки научных школ (проект НШ-8780.2016.8).

Таблица 1. Структурные данные эталонных решеток

Номер	Химическая формула	Число атомов	a , Å	b , Å	c , Å	α , град	β , град	γ , град	V	E , эВ	Кристаллическая система и класс
96-900-2246	$\text{Ca}_3\text{HO}_9\text{Si}_3$	30	11,124	7,3282	9,5885	97,64	89,31	89,40	774,636	-13994,022	P1, Triclinic
96-901-3985	$\text{Ca}_3\text{H}_6\text{O}_{10}\text{Si}_2$	84	16,347	5,8013	11,269	95,40	124,87	83,89	871,260	-30749,999	P1, Triclinic
96-900-9534	$\text{Ca}_6\text{H}_2\text{O}_{13}\text{Si}_3$	44	6,8516	6,9623	12,900	89,97	98,154	100,7	598,350	-24207,7486	P1, Triclinic
96-100-1769	$\text{H}_2\text{O}_2\text{Ca}$	12	3,5956	3,5956	4,9081	90	90	120	54,952	-19111,726	P-3m1, trigonal
96-900-1777	$\text{Al}_2\text{Ca}_3\text{H}_{12}\text{O}_{12}$	263	12,418	12,418	12,418	90	90	90	1914,98	-68425,534	M-3m, Cubic
96-900-5499	$\text{Ca}_2\text{H}_5\text{O}_{11}\text{Si}_3$	94	6,735	7,385	22,487	90	90	123,25	935,351	-28914,1345	B11m, monoclinic

Примечание. В табл. 1, 2: a , b , c – параметры решетки в ангстремах ($\text{Å} = 10^{-10}$ м); α , β , γ – углы решетки в градусах; V – объем решетки $a \cdot b \cdot c$.

Методика эксперимента. В работе были проведены исследования количественного содержания фаз методом Ритвельда цементного камня на основе портландцемента в зависимости от времени изотермического твердения при температуре 40 °С [11–13]. Для научных исследований были изготовлены образцы-кубики с длиной ребра 20 мм с водоцементным отношением В/Ц = 0,38. Укладка и уплотнение смеси производились в стальные формы марки 6ФК-20, соответствующих ГОСТ 22685–89.

Образцы портландцемента находились в формах в течение 3 ч на открытом воздухе. Затем после извлечения из форм помещались в рабочую зону пропарочной камеры с влажностью 100 %, где выдерживались при атмосферном давлении в течение 0, 3, 6, 19, 30, 43, 54 и 67 ч. Рентгеноструктурные исследования плоских граней цементного камня проводились на рентгенофазовом дифрактометре ДРОН4-07, который был модифицирован к цифровой обработке сигнала. Съемки производились на медном излучении (K_α) по схеме Брегга – Бретано с шагом $0,02^\circ$, временем экспозиции в точке 1 с и в угловом диапазоне $16\text{--}81^\circ$. Напряжение на рентгеновской трубке составляло 30 кВ, ток пучка 25 мА. На дифрактограммах (рис. 1–2) указаны экспериментальная, теоретическая интенсивности отраженного рентгеновского излучения, а также их разность в зависимости от угла отражения. Теоретическая интенсивность рассчитывается на основе суперпозиции интенсивностей отдельных фаз после полнопрофильного уточнения инструментальных, профильных структурных параметров решеток фаз [12]. В табл. 1 приведены номера эталонных карточек базы COD [14], которые использовались для качественного фазового анализа (КФА), химические формулы, имя, число атомов, параметры решеток и пространственная группа.

Результаты исследований. Необходимо отметить, что, несмотря на указание в химических формулах, в частности в $\text{Ca}_6\text{H}_2\text{O}_{13}\text{Si}_3$, $\text{Ca}_3\text{HO}_9\text{Si}_3$, атомов водорода, эти атомы в эталонных решетках отсутству-

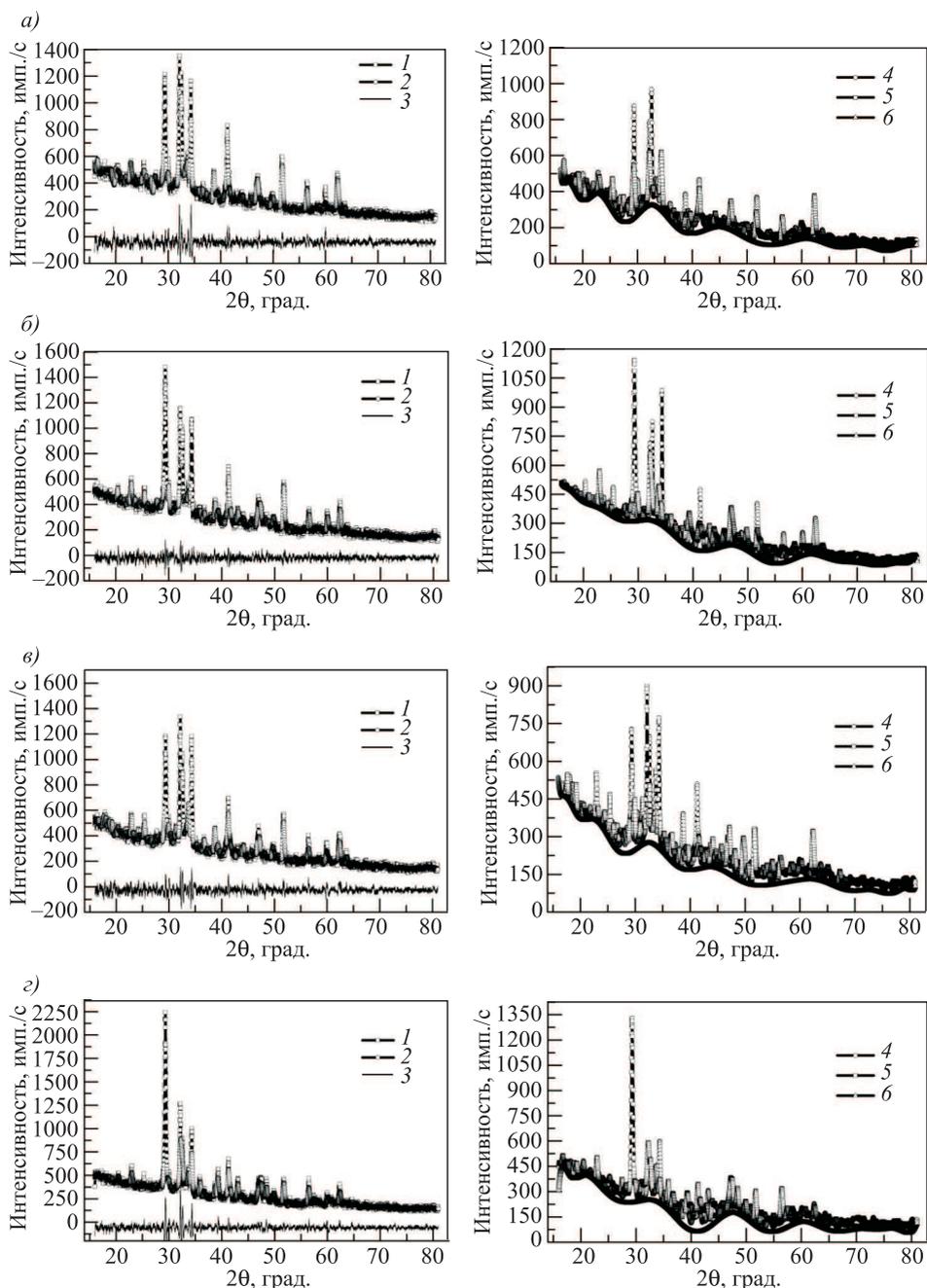


Рис. 1. Дифрактограммы цементного камня при времени твердения 0 ч (а), 3 ч (б), 6 ч (в) и 19 ч (г)

1 – экспериментальная; 2 – теоретическая дифрактограмма; 3 – разность интенсивностей; 4–6 – модельные дифрактограммы отдельных фаз

ют. В процессе твердения цементного камня, или гидратации силикатов, присутствие атомов Н в решетках обязательно. Поэтому для всех приведенных эталонных решеток (см. табл. 1) была проведена процедура внедрения атомов Н в программном комплексе TOPOS [13] с учетом класса симметрии исходных решеток. Из-за ограничения размеров статьи модифицированные решетки

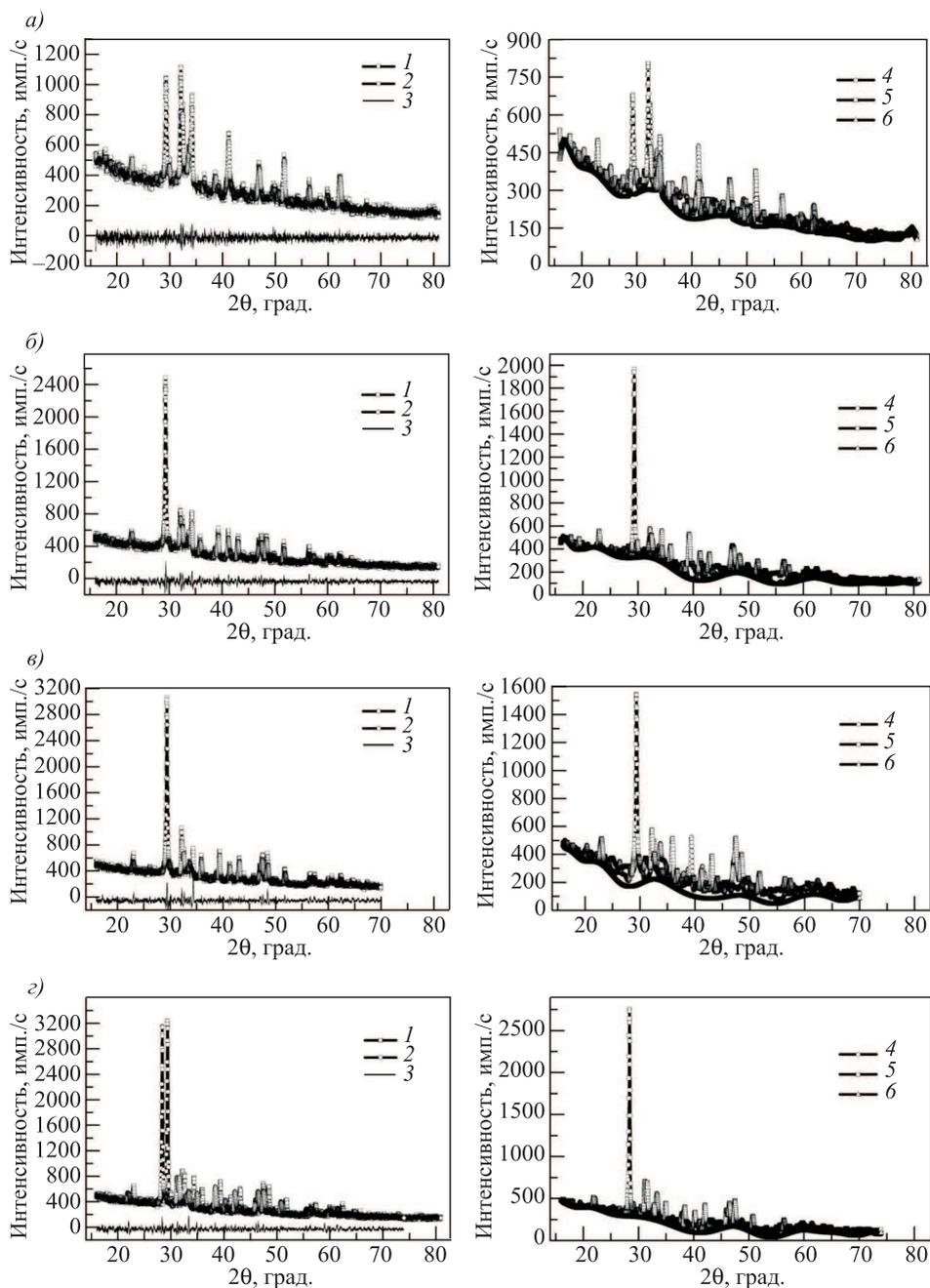


Рис. 2. Диффрактограммы цементного камня при времени твердения 30 ч (а), 43 ч (б), 54 ч (в) и 67 ч (г)

1 – экспериментальная; 2 – теоретическая диффрактограмма; 3 – разность интенсивностей; 4–6 – модельные диффрактограммы отдельных фаз

эталонных с пространственным распределением атомов (т.е. указанием координат) не приводятся. В качестве иллюстрации на рис. 3 и 4 представлены эталонные решетки $\text{Ca}_6\text{H}_2\text{O}_{13}\text{Si}_3$, $\text{Ca}_3\text{HO}_9\text{Si}_3$, в которых присутствуют атомы Н.

Результаты КФА методом Ритвельда всех исследуемых состояний в зависимости от времени твердения, доля вкладов интенсивности рентгеновского

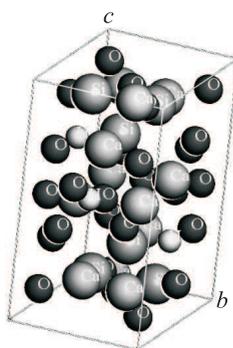
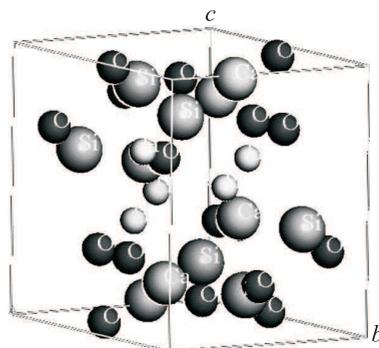


Рис. 3. Пространственное распределение атомов в решетке эталонных фаз $\text{Ca}_6\text{H}_2\text{O}_{13}\text{Si}_3$

Рис. 4. Пространственное распределение атомов в решетке эталонных фаз $\text{Ca}_3\text{HO}_9\text{Si}_3$



излучения отдельных фаз, а также массовая доля фаз цементного камня приведены в табл. 2. При КФА методом Ритвельда была достигнута высокая полно-профильная сходимость расчетных интегральных интенсивностей к экспериментальным дифрактограммам. Критерии сходимости R_{wp} даны в табл. 2.

С хорошей степенью достоверности обнаруженное содержание фаз оказывается доминирующим, так как вклад суммарной интенсивности фаз для всех состояний портландцемента в расчетную интенсивность, оказывается, превышает в целом 98 % (см. табл. 2). Количественный фазовый анализ портландцемента исследуемых состояний показал, что в цементном камне доминируют фазы $\text{Ca}_6\text{H}_2\text{O}_{13}\text{Si}_3$, $\text{Ca}_3\text{HO}_9\text{Si}_3$. В табл. 2 для отмеченных фаз приведены уточненные параметры решеток, а также их геометрические объемы. Количественное содержание фаз, определенное методом Ритвельда, позволило установить, что доля основных фаз в некоторой степени варьируется с изменением времени твердения. Параметры решеток отличаются как относительно исходных значений (см. табл. 1), так и решеток разных состояний. Из результатов, представленных в табл. 2, следует, что в портландцементе большую долю составляет фаза $\text{Ca}_6\text{H}_2\text{O}_{13}\text{Si}_3$, за исключением состояний при времени изотермического твердения 0 и 30 ч, где доминирует $\text{Ca}_3\text{HO}_9\text{Si}_3$. С ростом времени твердения не наблюдается существенного перераспределения количественного содержания между указанными фазами. Анализ объемов решеток фаз $\text{Ca}_3\text{HO}_9\text{Si}_3$ (см. табл. 1) показал, что наблюдается некоторая тенденция к росту объемов с ростом времени твердения за счет роста размеров в плоскости b, c фазы $\text{Ca}_6\text{H}_2\text{O}_{13}\text{Si}_3$. Внедрение атомов Н может привести к дестабилизации кристаллических решеток эталонных фаз.

Представляется актуальной квантово-механическая оценка энергии решеток фаз цементного камня с целью определения стабильности ячеек по отношению к расслоению на фазы чистых элементов Ca, O, H₂ и Si. Детали расчетов стабильности решеток из первых принципов показаны в [12]. Результаты расчетов энергии решеток $\text{Ca}_6\text{H}_2\text{O}_{13}\text{Si}_3$, $\text{Ca}_3\text{HO}_9\text{Si}_3$ приведены в табл. 3.

Отрицательные значения энергии решеток означают, что решетки находятся в метастабильном состоянии. Стабильность решеток оценивалась по формуле

$$\Delta E = E_c - \left(\frac{n_{cO}}{8} E_O + \frac{n_{cH}}{4} E_H + \frac{n_{cCa}}{4} E_{Ca} + \frac{n_{cSi}}{8} E_{Si} \right),$$

где ΔE – энергия смещения решетки, эВ; E_c – энергия решетки, эВ; $E_O = -3269,862$ эВ; $E_H = -55,405$ эВ, $E_{Ca} = -4006,140$ эВ, $E_{Si} = -858,155$ эВ – энергии кристаллических решеток «чистых» элементов O, H, Ca, Si.

Таблица 2. Структурные параметры и доля фаз в зависимости от времени твердения цементного камня при температуре 40 °С

Время твердения, ч	Фаза	a, Å	b, Å	c, Å	α, град.	β, град.	γ, град.	V	Доля интенсивности, %	Массовая доля, %	R _{нпр} %	Интегральная интенсивность, %
0	Ca ₆ H ₂ O ₁₃ Si ₃	6,884236	6,98282	12,90033	89,41	98,75	100,67	602,216	46,92	48,33	8,586	98,0
	Ca ₃ HO ₉ Si ₃	11,15297	7,22149	9,588183	96,69	90,02	88,67	766,809	51,11	51,68		
3	Ca ₆ H ₂ O ₁₃ Si ₃	6,885276	6,99894	12,94152	90,07	98,45	100,73	605,862	57,28	55,54	7,472	98,2
	Ca ₃ HO ₉ Si ₃	11,18536	7,23122	9,708221	97,90	88,54	89,65	777,493	41,02	44,46		
6	Ca ₆ H ₂ O ₁₃ Si ₃	6,87942	6,95226	12,90572	89,51	98,89	100,90	598,687	51,70	53,76	8,422	98,1
	Ca ₃ HO ₉ Si ₃	11,11692	7,29727	9,593348	97,43	89,94	88,53	771,440	46,42	46,17		
19	Ca ₆ H ₂ O ₁₃ Si ₃	6,864328	6,97719	12,92115	89,66	98,87	100,81	600,416	52,86	55,00	9,404	98,1
	Ca ₃ HO ₉ Si ₃	11,17915	7,32029	9,590729	97,65	89,64	88,79	777,669	45,25	44,99		
30	Ca ₆ H ₂ O ₁₃ Si ₃	6,898264	6,99375	12,92636	90,04	98,40	100,68	606,013	43,54	42,39	6,601	93,9
	Ca ₃ HO ₉ Si ₃	11,17721	7,33767	9,623607	97,74	89,67	88,97	781,940	50,44	51,66		
43	Ca ₆ H ₂ O ₁₃ Si ₃	6,893646	7,00873	12,93909	89,83	98,46	100,50	607,818	67,31	69,14	7,749	98,2
	Ca ₃ HO ₉ Si ₃	11,13384	7,28705	9,630278	97,55	89,34	88,87	774,333	30,98	30,86		
54	Ca ₆ H ₂ O ₁₃ Si ₃	6,828207	6,96931	12,94789	90,25	98,42	100,57	598,866	53,83	53,41	8,777	98,5
	Ca ₃ HO ₉ Si ₃	11,14620	7,31557	9,55579	96,99	90,16	88,74	773,202	44,72	46,59		
67	Ca ₆ H ₂ O ₁₃ Si ₃	6,85373	7,00669	13,13118	89,42	98,50	100,84	612,434	55,99	54,96	8,364	98,3
	Ca ₃ HO ₉ Si ₃	11,18141	7,33988	9,551254	97,92	89,87	88,48	776,101	42,47	45,04		

В формуле 8, 4, 4, 8 – число атомов в решетках чистых элементов, а $n_{cO} = 26$, $n_{cH} = 4$, $n_{cCa} = 12$, $n_{cSi} = 6$ – число атомов в решетке $Ca_6H_2O_{13}Si_3$ портландцемента исследуемых состояний. Для фазы $Ca_3HO_9Si_3$ числа n_{cO} , n_{cH} , n_{cCa} , n_{cSi} равны 18, 8, 6, 6 соответственно. Для оценки энергий элементов O, H, Ca, Si использовались эталоны из COD [15]. Энергии E_O , E_H , E_{Ca} , E_{Si} оказались равными: $-3269,862$; $-5,404$; $-4006,139$; $-858,155$ соответственно. Результаты расчетов энергии смешения фаз $Ca_6H_2O_{13}Si_3$, $Ca_3HO_9Si_3$ портландцемента различных состояний приведены в табл. 3.

Таблица 3. Энергия и стабильность решеток основных фаз E, эВ

Показатель	Фаза	0 ч	3 ч	6 ч	19 ч
E_c	$Ca_6H_2O_{13}Si_3$	-23610,83	-24013,49	-23792,79	-23876,18
	$Ca_3HO_9Si_3$	-14484,44	-14540,84	-16445,33	-14531,08
ΔE	$Ca_6H_2O_{13}Si_3$	-266,336	-668,996	-448,303	-531,691
	$Ca_3HO_9Si_3$	-363,61	-420,015	-2324,503	-410,258
Показатель	Фаза	30 ч	43 ч	54 ч	67 ч
E_c	$Ca_6H_2O_{13}Si_3$	-23631,05	-23952,00	-25347,81	-23935,07
	$Ca_3HO_9Si_3$	-14495,21	-14478,74	14392,89	-14548,33
ΔE	$Ca_6H_2O_{13}Si_3$	-286,559	-607,507	-2003,32	-590,575
	$Ca_3HO_9Si_3$	-374,382	-357,917	-272,067	-427,5

Как видно из табл. 3, энергия смешения решеток фаз всех исследуемых состояний оказывается отрицательной. Энергия, равная $-\Delta E$, называется энергией связи. Результаты указывают, что энергия связи $-\Delta E$ для фазы $Ca_6H_2O_{13}Si_3$ склонна к росту с увеличением времени твердения при температуре 40 °С. Для фазы $Ca_3HO_9Si_3$ наблюдается также тенденция к увеличению энергии связи. Можно полагать, что основные фазы цементного камня в процессе изотермического твердения стабилизируются. Энергия связи решеток разных состояний равны сравнительно большим значениям, т.е. решетки находятся в высокостабильных состояниях. Следовательно, в интервале стабильности допускается некоторое перераспределение отдельных атомов Ca, H, O, Si внутри решеток.

Закключение. Таким образом, исследование количественного фазового состава методом Ритвельда портландцемента с внедренными атомами водорода показало, что с высокой степенью надежности в портландцементе при исследуемом времени изотермического твердения доминируют фазы $Ca_6H_2O_{13}Si_3$, $Ca_3HO_9Si_3$. Установлена полная структурная информация решеток обнаруженных фаз. Показано, что фазы находятся в высокостабильных состояниях, причем с ростом времени твердения наблюдается тенденция к ее дальнейшей стабилизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В о в к А.И. Гидратация C_3S и структура C–S–H-фазы: новые подходы, гипотезы и данные // Цемент и его применение. 2012. № 3. С. 89–92.
2. Тейлор Х. Химия цемента. М.: Мир, 1996. 560 с.

3. Пашенко А.А., Мясникова Е.А., Гумен В.С., Евсютин Ю.Р., Салдугей М.М., Саницкий М.А., Сербин В.П., Токарчук В.В., Удачкин И.Б., Чистяков В.В. Теория цемента. Киев: Будивельник, 1991. 168 с.
4. Richardson J.G. Model structures for C-(A0-S-H (I) // *Acta Crystallograpica*. 2014. No. B70. P. 903–923.
5. Shasavari R., Buehler M.J., Pelling R. J.-M., Ulm F.-J. First-principles study of elastic constants and interlayer interactions of complex hydrated oxides: Case study of tobermorite and jennite // *The American Ceramic Society*. 2009. No. 92 (10). P. 2323–2330.
6. Skinner L.B., Chae S.R., Benmore C.J., Wenk H.R., Monteiro P.J.M. Nanostructure of calcium silicate hydrates in cements // *Physical Review Letters*. 2010. No. 104 (19). Pp. 195502-1–195502-4.
7. Myers R., Bernal S.L., Provis J.L. Generalized structural description of calcium-sodium aluminosilicate hydrate gels: The cross-linked substituted tobermorite model // *Langmuir*. 2013. No. 29. P. 5294–5306.
8. Murray S.J., Subrammani V.J., Selvan R.P., Hall K.D. Molecular dynamics to understand to mechanical behavior of cement paste // *Transportation Research Record*. 2010. No. 2142. P. 7582.
9. Torre A., Cabera A., Calventa A. Full phase analyses of portland clinker by penetrating synchrotron powder diffraction // *Analytical Chemistry*. 2001. Vol. 73, No. 2. P. 151–156.
10. Scrivener K.L., Fullmann T., Gallucci E., Walenta G., Bermejo E. Quantitative study of Portland cement hydration by X-ray diffraction // *Cement and Concrete Research*. 2004. No. 34. P. 1541–1547.
11. Saout G.Le., Kosada V., Scrivener K.L. Application of the Rietveld method of the analysis of anhydrous cement // *Cement and Concrete Research*. 2011. No. 41. P. 133–148.
12. Абзаев Ю.А., Копаница Н.О., Клименов В.А., Саркисов Ю.С., Горленко Н.П., Демьяненко О.В., Завьялов А.П. Моделирование структурного состояния аморфного таркосила // *Вестн. ТГАСУ*. 2015. № 3. С. 121–133.
13. Vlatov V.A., Shevchenko A.P., Serezhkin V.N. TOPOS 3.2: a new version of the program package for multipurpose crystal-chemical analysis // *Applied Crystallography*. 2000. No. 33. P. 1193.
14. Crystallography Open Database. URL: <http://www.crystallography.net> (Дата обращения: 17.01.2017).
15. Клопотов А.А., Абзаев Ю.А., Поткаев А.И., Волокитин О.Г. Основы рентгеноструктурного анализа в материаловедении. Томск: ТГАСУ, 2012. 275 с.

Гныря Алексей Игнатьевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: tsp_tgasu@mail.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Абзаев Юрий Афанасьевич, д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail: abzaev@tsuab.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Коробков Сергей Викторович, канд. техн. наук, доц.;

E-mail: korobkov_1973@mail.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Мошкин Дмитрий Ильич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: mokshin@sibmail.com

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Гаусс Ксения Сергеевна, ассист.; E-mail: gauss.ksyu@mail.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Бояринцев Александр Павлович, доц.; E-mail: plus2001@gambler.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 27.04.17

Gnyrya Aleksey Ignatievich, DSc, Professor; E-mail: tsp_tgasu@mail.ru

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

Abzaev Yuriy Afanasievich, DSc, Professor; E-mail: abzaev@tsuab.ru

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

Korobkov Sergey Viktorovich, PhD, Ass. Professor; E-mail: korobkov_1973@mail.ru

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

Mokshin Dmitriy Iljich, PhD, Ass. Professor; E-mail: mokshin@sibmail.com

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

Gauss Kseniya Sergeevna, Assistant; E-mail: gauss.ksyu@mail.r

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

Boyarintsev Aleksandr Pavlovich, Ass. Professor; E-mail: plus2001@rambler.ru

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

INFLUENCE OF THE LONG-TEMPERATURE SOLIDITY DURATION ON STRUCTURE OF CEMENT STONE

The paper presents a study on the quantitative content of phases in cement stone using the Rietveld method, depending on the time of isothermal hardening at a temperature of 40 °C. With a high degree of reliability, it is established that $\text{Ca}_6\text{H}_2\text{O}_{13}\text{Si}_3$, $\text{Ca}_3\text{HO}_9\text{Si}_3$ are main phases of the investigated cement stone. The presence of hydrogen atoms is taken into account in the specified lattices. The content of phases is evaluated from the contribution of calculated intensities of individual phases into the integral intensity, and from the value of the mass fraction of phases. It is shown that lattices of the listed phases are in a highly stable state, and there is a tendency to an increase in the binding energy of lattices with an increase in the hardening time.

Key words: cement stone, Rietveld method, lattice parameters, crystalline structure, quantitative phase analysis.

REFERENCES

1. Vovk A.I. Gidratatsiya C_3S i struktura C–S–H-fazy: novye podkhody, gipotezy i dannye [Hydration structure C_3S and C–S–H-phases: new approaches and data hypotheses]. Tsement i ego primenenie [Magazine of Cement and its Applications]. 2012. No. 3. Pp. 89–92. (in Russian)
2. Teylor Kh. Khimiya tsementa [Chemistry of cement]. Moscow: Mir, 1996. 560 p. (in Russian)
3. Pashenko A.A., Myasnikova E.A., Gumen V.S., Evsyutin Yu.R., Saldugey M.M., Sanitskiy M.A., Serbin V.P., Tokarchuk V.V., Udachkin I.B., Chistyakov V.V. Teoriya tsementa [Cement theory]. Kiev: Budivel'nik, 1991. 168 p. (in Russian)
4. Richardson J.G. Model structures for C-(A0-S-H (I). Acta Crystallograpica. 2014. No. B70. Pp. 903–923.
5. Shasavari R., Buehler M.J., Pelling R. J.-M., Ulm F.-J. First-principles study of elastic constants and interlayer interactions of complex hydrated oxides: Case study of tobermorite and jennite. The American Ceramic Society. 2009. No. 92 (10). Pp. 2323–2330.
6. Skinner L.B., Chae S.R., Benmore C.J., Wenk H.R., Monteiro P.J.M. Nanostructure of calcium silicate hydrates in cements. Physical Review Letters. 2010. No. 104 (19). Pp. 195502-1–195502-4.
7. Myers R., Bernal S.L., Provis J.L. Generalized structural description of calcium-sodium aluminosilicate hydrate gels: The cross-linked substituted tobermorite model. Langmuir. 2013. No. 29. Pp. 5294–5306.

8. Murray S.J., Subrammani V.J., Selvan R.P., Hall K.D. Molecular dynamics to understand to mechanical behavior of cement paste. *Transportation Research Record*. 2010. No. 2142. Pp. 75–82.
9. Torre A., Cabera A., Calventa A. Full phase analyses of portland clinker by penetrating synchrotron powder diffraction. *Analytical Chemistry*. 2001. Vol. 73, No. 2. Pp. 151–156.
10. Scrivener K.L., Fullmann T., Gallucci E., Walenta G., Bermejo E. Quantitative study of Portland cement hydration by X-ray diffraction. *Cement and Concrete Research*. 2004. No. 34. Pp. 1541–1547.
11. Saout G.Le., Kocada V., Scrivener K.L. Application of the Rietveld method of the analysis of anhydrous cement. *Cement and Concrete Research*. 2011. No. 41. Pp. 133–148.
12. Abzaev Yu.A., Kopanitsa N.O., Klimenov V.A., Sarkisov Yu.S., Gorlenko N.P., Dem'yanenko O.V., Zav'yalov A.P. Modelirovanie strukturnogo sostoyaniya amorfnogo tarkosila [Structural state modeling of amorphous tarkosil]. *Vestnik TGASU [Magazine of Vestnik TSUAB]*. 2015. No. 3. Pp. 121133. (in Russian)
13. Blatov V.A., Shevchenko A.P., Serezhkin V.N. TOPOS 3.2: a new version of the program package for multipurpose crystal-chemical analysis. *Applied Crystallography*. 2000. No. 33. P. 1193.
14. Crystallography Open Database. Available at: URL: <http://www.crystallography.net> (Date of access: 17.01.2017).
15. Klopotov A.A., Abzaev Yu.A., Potekaeв A.I., Volokitin O.G. Osnovy rentgenostrukturnogo analiza v materialovedenii [Fundamentals of X-ray diffraction in materials science]. Tomsk: TSUAB, 2012. 275 p. (in Russian)

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА



УДК 627.514 : 628.542

Х. ФАЙЗИЕВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УПЛОТНЯЕМОСТИ ДИГИДРАТНОГО ФОСФОГИПСА ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ДАМБ ГИДРООТВАЛА

Приводятся результаты изучения процесса уплотнения фосфогипса на моделях, построенных на отвалах Самаркандского химзавода. Получены расчетные зависимости и параметры для механизированного возведения дамб из фосфогипса с применением легких и средних по массе катков. Внедрение данного предложения позволит утилизировать отходы производства фосфатных удобрений.

Ключевые слова: свойства фосфогипса, гидроотвал фосфогипса, подготовка фосфогипса, послынная отсыпка и укатка, механизмы укатки, наращивание дамб из фосфогипса.

Использование дигидратного фосфогипса в качестве строительного материала для возведения дамб гидроотвалов при их наращивании является одним из актуальных вопросов.

Фосфогипсы представляют собой вторичный продукт (отходы) экстракции фосфорной кислоты (ЭФК) при производстве фосфорных удобрений. По способу образования их разделяют на две группы, резко отличающиеся по химическому и гранулометрическому составам, физико-механическим и прочностным свойствам: I – фосфориты, обладающие пластическими свойствами супесчано-суглинистых грунтов; II – апатиты со свойствами пылеватых мелкозернистых песков. В зависимости от установленного режима ЭФК на предприятии образуются фосфогипсы дигидратные ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) и полугидратные ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$). По степени нейтрализации и отмывки фосфогипсы подразделяют на кислые ($\text{pH} = 2-5$), нейтрализованные ($\text{pH} = 5-7$) и отмывные от водорастворимой части P_2O_5 .

Возведение насыпных дамб гидроотвалов фосфогипса методом механического уплотнения предусматривает разравнивание подготовленного на картах просушки слоя фосфогипса и его уплотнение катками. Искусственное уплотнение фосфогипса должно обеспечивать повышение устойчивости, уменьшение осадки и увеличение водонепроницаемости дамб обвалования.

Степень уплотнения фосфогипса устанавливают на основании исследований методом стандартного уплотнения, при котором создаются его максимальная плотность и оптимальная влажность. Требуемая плотность фосфогипса выражается объемной массой скелета или коэффициентом уплотнения, величина которого меняется в зависимости от его группы, закисленности, а также степени отмывки от P_2O_5 . Для дигидратных фосфогипсов I группы методом стандартного уплотнения полученные характеристики представлены на рис. 1 при работе падающего груза 0,55 и 1,06 кДж,

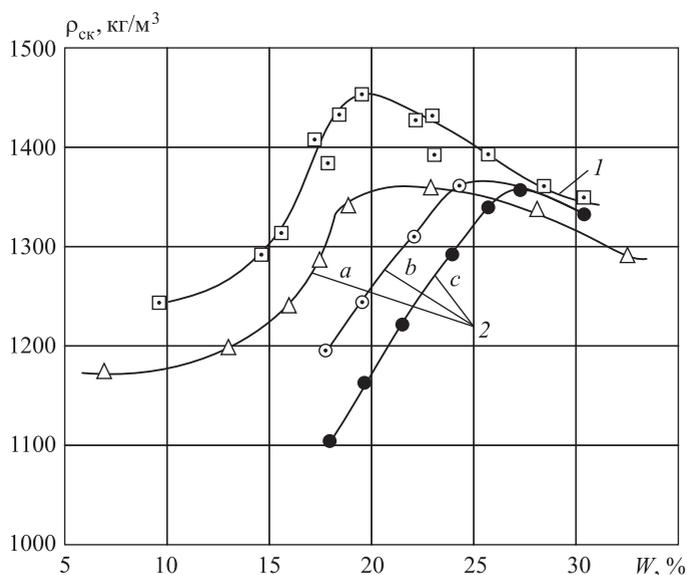


Рис. 1. Уплотняемость фосфогипсов

1 – алмалыкские отмытые P_2O_5 (затраченная работа $A = 1,06$ кДж);
 2 – самаркандские (a – исходные ($A = 1,06$ кДж), в и с – нейтрализованные с $A = 1,06$ и $0,55$ кДж)

что соответствует работе уплотняющих механизмов с легкими и средними по массе катками. Степень плотности $I_d = 1$ для кислых и нейтрализованных фосфогипсов соответствует объемной массе скелета $\rho_{ск} = 1350$ кг/м³, а для отмытых фосфогипсов $\rho_{ск} = 1450$ кг/м³. Допустимые пределы изменения влажности и плотности укладываемых в тело дамб фосфогипсов представлены в табл. 1.

Перед началом возведения ограждающих дамб, а также в процессе их строительства должны быть проведены опытные работы по уплотнению

Таблица 1. Пределы изменения плотности и влажности фосфогипсов, укладываемых в тело дамб

Параметр	Фосфориты		
	кислые	нейтрализованные	отмытые
Объемная масса скелета, кг/м ³	1300–1350	1300–1350	1400–1450
Влажность, %	18–28	22–28	17–25

фосфогипса с целью уточнения толщины уплотняемых слоев, числа проходов грунтоуплотняющих машин по фосфогипсу, объемной массы скелета и оптимальной влажности, времени уплотнения.

В производственных условиях был реализован дробный факторный эксперимент с полуреplikой 2_{IV}^{4-1} для установления интерполяционной модели исследуемого процесса [1, 2]. По результатам изучения свойств фосфогипса были выбраны основные факторы, влияющие на параметр оптимизации Y ($\rho_{ск}$, кг/м³), с уровнями их варьирования (табл. 2).

Таблица 2. Характеристика факторов процесса уплотнения

Фактор	Уровень			Интервал варьирования
	-1	0	+1	
\tilde{X}_1 – оптимальная влажность $W_{оп}$, %	17,6	21,5	25,4	3,9
\tilde{X}_2 – масса катка Q , т	10	20	20	10
\tilde{X}_3 – число проходов катка по одному следу n	4	6	8	2
\tilde{X}_4 – высота слоя отсыпки фосфогипса h , см	20	35	50	15

Модель опытных укаток размером в плане 20×80 м² была возведена бульдозером Т-130 из кислого фосфогипса на предварительно спланированной площадке гидроотвала Самаркандского химзавода. Она состояла из двух симметричных участков. Левый был отсыпан из фосфогипса со средней влажностью на нижнем уровне варьирования $\tilde{X}_1 = 17,6$ % ($X_1 = -1$), а правый на верхнем уровне $\tilde{X}_1 = 25,4$ % ($X_1 = 1$). Высота слоя отсыпки модели была переменной и увеличивалась от краев $h = 20$ м к центру раздела ее по влажности до $h = 50$ м, что обеспечивало варьирование фактора \tilde{X}_4 в заданных пределах. Укатки с варьированием факторов \tilde{X}_2 и \tilde{X}_3 проведены автосамосвалами БелАЗ-540 массой 21 т и грузоподъемностью 27 т, обеспечивающими давление шин на фосфогипс, эквивалентное легким каткам массой до 10 т в порожнем состоянии и средним каткам массой до 30 т в груженом состоянии. Ширина уплотняемых полос каждого следа составляла 1,1 м, на модели было осуществлено четыре основных с повторением числа проходов на двух уровнях \tilde{X}_4 4 и 8 при груженом и порожнем самосвале.

Отбор каждой серии проб на плотность и влажность осуществлен с помощью стандартных колец полевой лаборатории Литвинова (ПЛЛ-9). Рандомизация эксперимента во времени не проводилась, так как пробы отобраны в течение двух дней. Характеристики плотности и влажности определены в лаборатории по стандартной методике.

Матрица планирования эксперимента, данные исследований серий образцов фосфогипса, а также результаты статистической обработки представлены в табл. 3.

Анализ результатов исследования показал незначимость взаимодействий факторов X_1, X_2 и X_2, X_3 (коэффициенты $B_{12} = B_{13} = 0$). Дисперсии опыт-

Таблица 3. Результаты исследований процесса укатки фосфогипса

Серия отбора проб	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_2X_3	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	\bar{y}	S^2	\hat{y}	$(\bar{y} - \hat{y})^2$
1	+	+	+	-	-	-	1372	1401	-	-	1386	421	1372	196
2	+	-	-	-	-	+	1238	1216	-	-	1227	242	1234	49
3	+	+	-	-	+	+	1284	1276	-	-	1280	32	1274	36
4	+	-	+	-	+	-	1135	1153	1138	-	1142	93	1156	196
5	+	+	+	+	+	+	1335	1365	-	-	1350	450	1356	36
6	+	-	-	+	-	-	1173	1128	1174	1180	1164	578	1150	196
7	+	+	-	+	-	-	1343	1354	1347	1354	1350	30	1364	196
8	+	-	+	+	-	+	1330	1300	1310	1350	1323	492	1317	36
1278 63,8 22,5 19 -43,8 17,3											$S_y^2 = 309$		$S_{ад}^2 = 470$	

ных характеристик S_y , согласно критерию Бартлетта однородны, так как экспериментальное его значение $\chi^2_{ЭК} = 8,15$ оказалось меньше теоретического $\chi^2_T = 14,07$ при степени свободы $f = 7$ и уровне значимости $q = 5\%$. Проверка нуль-гипотезы по критерию Фишера показала ее адекватность, поскольку экспериментальное значение $\frac{S_{ад}^2}{S_y^2} = 1,52$ меньше теоретического

$F_T = 19,4$ при $f_1/f_2 = \frac{2}{15}$ и $q_1 - p = 5\%$ ($S_{ад}^2$ – дисперсия адекватности математической модели).

Уравнение регрессии математической модели процесса укатки получено в виде

$$\hat{y} = 1278 + 63,8X_1 + 22,5X_2 + 19X_3 - 43,8X_4 + 17,3X_2X_3. \quad (1)$$

Переход к интерполяционному уравнению с напорными переменными осуществляется с помощью соотношения

$$X_i = \frac{\tilde{X}_i - \tilde{X}_{oi}}{\Delta\tilde{X}_i}, \quad (2)$$

где X_i – кодированное значение фактора; \tilde{X}_i , \tilde{X}_{oi} и $\Delta\tilde{X}_i$ – соответственно натуральные значения фактора, его основного уровня и интервала варьирования.

Значимость коэффициентов b_i уравнения проверена по критерию Стьюдента. Доверительный интервал для них составил

$$\Delta b_i = \pm 13,3 \text{ кг/м}^3 \text{ (при } t = 2,131, f = 15,1 - p = 5\%).$$

Анализ уравнения регрессии, устанавливающий влияние факторов, с учетом ограничения параметра оптимизации $\hat{y} = \rho_{ск} = 1300 \text{ кг/м}^3$ представлен на рис. 2.

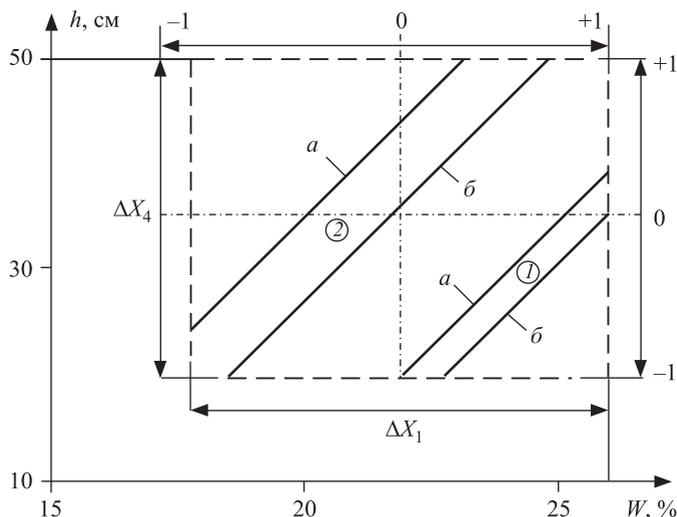


Рис. 2. Зависимость величины слоя отсыпки h от изменения влажности $W_{\text{опт}}$ и уплотняющих характеристик при расчетной плотности $\rho_{\text{ск}} = 1300 \text{ кг/м}^3$

Масса катка Q : 1 – 10 т; 2 – 30 т; число проходов по следу n :
 a – 6, $б$ – 8; интервалы варьирования факторов ΔX_1 и ΔX_4

На основании полученных результатов исследований определены расчетные параметры процесса укатки дамб из кислого или нейтрализованного дигидратного фосфогипса (табл. 4) и по техническим характеристикам подобраны типы рекомендуемых катков. Табличные данные можно принять в качестве расчетных и при использовании для возведения ограждающих дамб отмытого от P_2O_5 фосфогипса. При этом достигаемые расчетные характеристики уплотняемости согласно результатам исследований будут составлять $\rho_{\text{ск}} = 1400\text{--}1450 \text{ кг/м}$.

Таблица 4. Расчетные параметры процесса укатки фосфогипса и рекомендуемые типы катков для возведения дамб

Расчетная масса катка Q , т	Число проходов по следу n	Диапазон оптимальной влажности $W_{\text{опт}}$, %	Высота отсыпae-мого слоя h , см	Техническая характеристика катка
10	6	21,5–27	20	Прицепные кулачковые без балласта ДУ-27 ($Q = 9,2$ т), ДУ-32 А (9 т), ДУ-3 (13 т)
10	6	22,5–27	25	
18	6	21–26	30	Прицепные кулачковые с балластом ДУ-27 (17,6 т), ДУ-32 (18 т) Самоходные на пневмошинах ДУ-31 (с балластом 16 т), ДУ-29 (без балласта 23 т)
30	6	20,5–25,5	30	Прицепные кулачковые ДУ-3 (с балластом 29 т)
30	8	18,5–25,5	30	Полуприцепные на пневмошинах ДУ-16 В (с балластом 35,9 т)
30	8		40	
		20–25,5		Самоходные на пневмошинах ДУ-29 (с балластом 30 т)

Выводы. Применение легких катков ограничивает высоту отсыпаемого слоя до 20–25 см и сужает диапазон оптимальной влажности фосфогипса. Легкие катки целесообразны при использовании фосфогипса с оптимальной влажностью, близкой к ее верхней границе. Расчетная плотность достигается уже при шести проходках по следу.

Наиболее эффективно при возведении дамб из фосфогипса применение катков массой 18–30 т. При высоте отсыпаемого слоя 30–40 см диапазон оптимальной влажности при подготовке карьера увеличивается до 18,5–26 %.

Подбор технических характеристик катков осуществляется с учетом полученных критериев по послойной отсыпке и укатке фосфогипса. Расчетные параметры процесса укатки фосфогипса и рекомендуемые типы катков для возведения дамб приведены в табл. 4.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1971. 279 с.
2. Файзиев Х., Сайфиддинов С. Вопросы проектирования, строительства и эксплуатации накопителей фосфогипса. Ташкент: ТАСИ, 2009. 220 с.

Файзиев Хомитхон, канд. техн. наук, доц.; E-mail: Xomitxon @ mail.ru
Ташкентский архитектурно-строительный институт, Узбекистан

Получено после доработки 23.04.17

Fayziev Homithon, PhD, Ass. Professor; E-mail: Xomitxon @ mail.ru
Tashkent Architecture and Construction Institute, Uzbekistan

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE DIGIDRATE PHOSPHOGYPS COMPLEX FOR THE CONSTRUCTION OF THE DAMB HYDROTOTAL

The results of studying the process of condensation of phosphogypsum on the models built on the heaps of the Samarkand chemical plant are presented. The calculated dependencies and parameters for the mechanized erection of dams from phosphogypsum with the use of light and medium-sized rollers are obtained. Introduction of this offer will allow to utilize waste of productions of phosphatic fertilizers.

Key words: properties of phosphogypsum, hydrophobic phosphogypsum, preparation of phosphogypsum, layered deposition and rolling, rolling mechanisms, build-up of phosphogypsum dams.

REFERENCES

1. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy [Planning an experiment in the search for optimal conditions]. Moscow, 1971. 279 p. (in Russian)
2. Fayziev H., Sayfiddinov S. Voprosy proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii nakopiteley fosfogipsa [Questions of designing, construction and operation of phosphogypsum storage tanks]. Tashkent, 2009. 220 p. (in Russian)

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО



УДК 627.45.001.24

В.В. ДЕГТЯРЕВ, Е.О. ОРЛОВА, А.П. ЯНЕНКО

О НЕКОТОРЫХ АСПЕКТАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОПУСКЕ СУДОВ ЧЕРЕЗ СУДОПРОПУСКНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Рассмотрены вопросы, касающиеся проектирования и эксплуатации судопропускных гидротехнических сооружений (шлюзов). В настоящее время действующим нормативным документом является СП 101.13330.2012 «Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.06.07–87». Как показывают исследования, в шлюзах, запроектированных в соответствии с указанным нормативным документом, в процессе судопропуска могут возникать нештатные ситуации, приводящие к авариям. Для исключения последних скорость движения судов не должна превышать некоторой критической величины, что позволит избежать удара судна о дно камеры шлюза, а следовательно, и аварии.

К л ю ч е в ы е с л о в а: судоходный шлюз, вывод судна из камеры, скорость движения, аварийные ситуации, экспериментальные и натурные исследования, критическая скорость.

Габаритные размеры камер шлюзов определяются в строгом соответствии с нормативными документами. Для расчета этих сооружений на данный момент времени действующим является СП 101.13330.2012 «Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.06.07–87» (СПб., 2012). В этом нормативном документе даны зависимости (рекомендации), в соответствии с которыми при проектировании следует определять длину и ширину камеры судоходного шлюза, а также глубину воды на его пороге. Кроме того, указываются значения средних скоростей движения шлюзуемого судна в камере судоходного сооружения.

Специалисты, занимающиеся расчетами и проектированием судоходных сооружений, действуя строго в соответствии с рекомендациями этого нормативного документа, который является законом, относительно легко находят габаритные размеры камер судоходного шлюза под конкретное расчетное судно, задаваемое заказчиком строительства. При этом проектировщики, как правило, мало задумываются над вопросом, а будет ли запроектированное ими судопропускное сооружение удовлетворять вопросам

безопасности по одной простой причине, что все свои расчеты они осуществляют в строгом соответствии с утвержденным на высшем государственном уровне нормативным документом, который с их точки зрения должен исключать возникновение нештатных ситуаций при движении судна в камере шлюза.

Однако, как показывают проведенные исследования [1–7], в шлюзах, запроектированных в соответствии с нормативными документами, во время судопропуска возникают нештатные ситуации, которые могут привести к серьезной аварии.

Если проектировщику действовать строго по «букве закона», то значения ширины и длины камеры шлюза найдутся им сравнительно легко по приведенным в СНиП зависимостям.

Ширину камеры шлюза в нем предлагается находить по формуле

$$b_{c,ef} = \sum_1^{n_1} b_s + \sum_1^{n_1+1} \Delta b_s,$$

а длину камеры шлюза

$$l_{c,ef} = \sum_1^{n_1} l_s + \sum_1^{n_1+1} \Delta l.$$

В этих формулах $\sum_1^{n_1} l_s$ – сумма длин расчетных судов, шлюзуемых одновременно и устанавливаемых в камере шлюза в кильватер;

Δl – запас по длине камеры в каждую сторону и между судами, устанавливаемыми в камере шлюза в кильватер, определяемый по формуле

$$\Delta l = 2 + 0,03l_s;$$

b_s – ширина расчетного судна;

Δb_s – запас по ширине в каждую сторону и между рядом стоящими в камере судами.

Затем, используя приведенную в СНиП зависимость

$$h \geq 1,3S,$$

находят глубину воды на пороге камеры шлюза,

где S – осадка расчетного судна в условных обозначениях СНиП.

После этих расчетов возникает первое противоречие, которое заключается в том, что проектировщик уверен, что при этих размерах шлюзуемое судно будет двигаться в камерах шлюза со скоростями, рекомендуемыми СНиП (таблица).

Однако во время эксплуатации судопропускных сооружений очень часто возникают ситуации, которые приводят к тому, что указанные в данном нормативном документе скорости движения судов, особенно в нижней камере шлюза, не могут быть обеспечены. Основной причиной этому являются малые глубины в камере и на пороге шлюза, что характерно для маловодного периода навигации. И если капитан шлюзуемого судна попытается выводить его из камеры шлюза с указанной в СНиП скоростью, это приведет к увеличению дифферента и посадке кормы судна на дно камеры шлюза, т. е. возникновению аварийной ситуации.

Рекомендуемые скорости движения судов

Шлюзуемый объект	Средняя скорость движения, м/с		
	вход	выход	переход из одной камеры в другую
Скоростные суда	2	3	1,5
Самоходные суда	1	1,4	0,75
Толкаемые составы	0,9	1,2	0,75
Буксируемые составы	0,7	1	0,6
Плоты	0,6	0,6	0,5

В основе этой ситуации находится тот факт, что скорость движения судна в камере судопропускного сооружения целиком и полностью зависит как от габаритных размеров камер шлюза (ее длины и ширины), так и от глубины воды в ней. Проведенные нами теоретические и экспериментальные исследования показывают, что существует так называемая критическая скорость вывода судна, превышение которой приведет к посадке судна на дно камеры шлюза. Значение этой скорости определяется по следующей зависимости, полученной ранее,

$$V_c^{кр} = \frac{3 h_k - T_c}{8 \Omega_c} \sqrt{g B_k (B_k h_k - \Omega_c)}. \quad (1)$$

Расчеты по этой формуле хорошо подтверждаются результатами экспериментальных исследований [8], проведенных на кафедре гидравлики и гидротехнических сооружений НГАСУ (Сибстрин). Заметим, что в то же время скорость движения судна в камере шлюза ограничена полезной тягой, которую развивают движители судна или механизмы для проводки судна. Обозначив ее величину через F_{max} , нами было получено выражение для оценки максимальной величины скорости, которую может развивать судно при выводе из камеры шлюза в подходной канал

$$V_c^{max} = (1 + \varepsilon^*) \frac{F_{max}}{\gamma_B \Omega_c^2} \sqrt{g B_k (B_k h_k - \Omega_c)}. \quad (2)$$

В этих формулах h_k – глубина воды в камере шлюза;

T_c – осадка судна;

Ω_c – площадь судна по миделю;

B_k – ширина камеры шлюза;

$$\varepsilon_* = \frac{\mu_*}{\mu_* + \mu_c}; \quad \mu_* = \frac{B_{п.к} C_{п.к}}{B_k C_k}; \quad \mu_c = \sqrt{1 - \sigma_c}; \quad \sigma_c = \frac{\Omega_c}{B_k h_k};$$

C – скорость распространения малых возмущений в подходном канале или камере с соответствующими индексами – «п.к» или «к», $C = \sqrt{g \frac{\omega}{B}}$;

ω – площадь камеры или канала с соответствующими индексами;

B – ширина камеры или канала поверху также с соответствующими индексами.

Исходя из этих зависимостей, приходим к выводу, что во избежание возникновения аварийной ситуации, скорость движения судна в камере шлюза не должна превышать ее критическую величину, определяемую зависимостью (1).

Попутно заметим, что, как это следует из зависимости (2), скорость движения судна в камере шлюза ограничена мощностью его силовых установок или механизмов заводки. И при понижении уровня воды в нижнем бьефе, и, как следствие, в нижней камере шлюза судно не сможет развить ту скорость, которая указана в рассматриваемом нормативном документе. *И если капитан самоходного судна с целью увеличения скорости движения судна будет пытаться увеличить обороты гребного винта, то это при малой глубине воды в камере шлюза может также привести к удару кормы судна о дно камеры шлюза.*

Чтобы не допустить аварийных ситуаций при выводе судна в канал нижнего бьефа при низких уровнях воды в нем, существует возможность пройти судном над порогом шлюза, избежав при этом удара кормой *и более высокой скорости вывода* судна из камеры, если обеспечить в период выхода судна из камеры полезные попуски воды из смежной камеры или непосредственно из водохранилища через действующую или специальную систему питания шлюза.

Величина требуемого расхода легко может быть найдена из условия, что при этой процедуре потребуется увеличить уровень воды в камере всего на 10–15 см на относительно короткий промежуток времени. Следует отметить, что полезные попуски воды дадут необходимый эффект в случае, когда судно выходит из камеры в нижний бьеф.

Какой же вывод следует сделать на основе представленного материала? С нашей точки зрения, отдельные положения рассматриваемого нормативного документа нуждаются в корректировке, в частности, вопросы расчета глубины воды в камере шлюза, скоростей движения судов в ней. Кроме всего прочего следует указать на то, что при расчете глубины воды в камере шлюза, случай вывода судов из камер должен быть расчетным.

Для того чтобы осуществить все это, думается, что авторам рассматриваемого нормативного документа следует обратиться к специалистам, занимающимся вопросами расчета и исследования гидродинамических аспектов пропуска судопропускных сооружений, высказать свою точку зрения по этому вопросу на страницах научных изданий, чтобы затем обсудить полученные предложения и рекомендации и выработать согласованную позицию по рассматриваемому вопросу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кирьяков С.С., Тимошина В.И., Белякова Т.А. Допустимые скорости движения судов в шлюзах // Речной транспорт. 1975. № 8. С. 44–45.
2. К л ю е в В., Г а п е е в А. Ускорение пропуска судов через шлюзы // Речной транспорт. 1980. № 11. С. 38–39.

3. А т а в и н А.А., Я н е н к о А.П. О колебаниях уровня воды при выводе судна из камеры судопропускного сооружения // Динамика сплошной среды. Новосибирск, 1977. Вып. 30. С. 35–52.
4. А т а в и н А.А., В а с и л ь е в О.Ф., Я н е н к о А.П. Гидродинамические процессы в судопропускных сооружениях. Новосибирск: Наука, 1993. 327 с.
5. А т а в и н А.А., Б у к р е е в В.И., В а с и л ь е в О.Ф., Д е г т я р е в В.В., Я н е н к о А.П. Гидродинамические аспекты нештатных и аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях: моногр. Новосибирск, 2009. 327 с.
6. А т а в и н А.А., В а с и л ь е в О.Ф. Оценка возможных последствий аварий на судоходном шлюзе, связанных с разрушением его камер // Гидравлические и гидродинамические аспекты надежности и безопасности гидротехнических сооружений: Тез. докл. междунар. симп. СПб.: Всерос. науч.-исслед. ин-т гидротехники, 2002. 121 с.
7. Р о м а н о в Е.М., Я н е н к о А.П. О некоторых результатах экспериментального исследования условий ввода судна большой грузоподъемности в камеру судопропускного сооружения // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1975. № 10. С. 101–104.
8. А т а в и н А.А., Я н е н к о А.П. О скоростях движения судна в камере судоходного шлюза при расчете его пропускной способности // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 7. С. 60–66.

Дегтярев Владимир Владимирович, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Орлова Екатерина Олеговна, ст. препод.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Яненко Аркадий Петрович, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 13.04.17

Degtyarev Vladimir Vladimirovich, DSc, Professor

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

Orlova Ekaterina Olegovna, Senior Lecturer

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

Yanenko Arkadiy Petrovich, DSc, Professor

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

ABOUT SOME ASPECTS ENSURING OF SECURITY IN PROCESS OF SHIPS MOVEMENT THROUGH NAVIGABLE LOCKS

In the article questions concerning design and exploitation of navigable locks are considered. The current operating normative document is CR 101.13330.2012 «Afflux walls, navigable locks, fish ladder and fish protection constructions. Actualized release Construction Norms and Regulations release 2.06.07–87». The investigations revealed ship accidents and emergency situations occurred on navigable locks constructed according to his normative document. To avoid this abnormal situations the speed of the ship movement should not exceed critical range, that allows to avoid hitting the ship on the lock chamber bottom and ship accident.

Key words: navigable lock, ship movement from lock chamber, speed of movement, crash situations, experimental and natural investigations, critical speed.

REFERENCES

1. Kir'yakov S.S., Timoshina V.I., Belyakova T.A. Dopustimye skorosti dvizheniya sudov v shlyuzakh [Admissible speed of the movement of courts in locks]. Rechnoy transport [River transport]. 1975. No 8. Pp. 44–45. (in Russian)
2. Klyev V., Gapeev A. Uskorenie propuska sudov cherez shlyuzy [Acceleration of the admission of courts through locks]. Rechnoy transport [River transport]. 1980. No. 11. Pp. 38–39. (in Russian)
3. Atavin A.A., Yanenko A.P. O kolebaniyakh urovnya vody pri vyvode sudna iz kamery sudopropuskhnogo sooruzheniya [About fluctuations of water level at a vessel conclusion from the camera of shipping building]. Dinamika sploshnoy sredy [Dynamics of the continuous environment]. Novosibirsk, 1977. Vol. 30. Pp. 35–52. (in Russian)
4. Atavin A.A., Vasil'ev O.F., Yanenko A.P. Gidrodinamicheskie protsessy v sudopropusknykh sooruzheniyakh [Hydrodynamic processes in shipping facilities]. Novosibirsk, Nauka, 1993. 327 p. (in Russian)
5. Atavin A.A., Bukreev V.I., Vasil'ev O.F., Degtyarev V.V., Yanenko A.P. Gidrodinamicheskie aspekty neshtatnykh i avariynykh situatsiy na gidrotekhnicheskikh sooruzheniyakh: monografiya [Hydrodynamic aspects supernumerary and emergencies on hydraulic engineering constructions: monograph]. Novosibirsk, 2009. 327 p. (in Russian)
6. Atavin A.A., Vasil'ev O.F. Otsenka vozmozhnykh posledstviy avariyy na sudokhodnom shlyuze, svyazannykh s razrusheniem ego kamer [Evaluation of possible consequences of the accidents on a navigable gateway associated with the destruction of its chambers]. Gidravlicheskie i gidrodinamicheskie aspekty nadezhnosti i bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzheniy: Tez. dokl. mezhdunar. konf. [Hydraulic and hydrodynamic aspects of reliability and safety of hydraulic structures: Proceedings of the International Symposium]. St. Petersburg, All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering, 2002. 121 p. (in Russian)
7. Romanov E.M., Yanenko A.P. O nekotorykh rezul'tatakh eksperimental'nogo issledovaniya usloviy vvoda sudna bol'shoy gruzopod'emnosti v kameru sudopropuskhnogo sooruzheniya [About some results of experimental studies of conditions of an entrance of the vessel with big loading capacity, in the camera of navigation pass]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture]. 1975. No. 10. Pp. 101–104. (in Russian)
8. Atavin A.A., Yanenko A.P. O skorostyakh dvizheniya sudna v kamere sudokhodnogo shlyuza pri raschete ego propusknoy sposobnosti [About speeds of the movement of the vessel in the camera of a navigable lock of calculation of its capacity]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2014. No. 7. Pp. 60–66. (in Russian)

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА



УДК 697.94

О.Д. САМАРИН

О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СВОБОДНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В СИСТЕМАХ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА В ХОЛОДНЫЙ ПЕРИОД ГОДА

Рассмотрена возможность энергосбережения в системах кондиционирования воздуха помещений общественных зданий за счет отказа от использования режима «свободного охлаждения». Проведены расчеты, позволяющие определить необходимое для этого снижение температуры притока в прямооточных системах кондиционирования при условии подачи санитарной нормы наружного воздуха для офисного помещения и при нормативном воздухообмене для торгового зала в климатических условиях Москвы для холодного периода года. Показано, что при характерном уровне теплопоступлений и теплопотерь в большинстве случаев удастся обеспечить требуемый уровень комфортности при организации воздухораспределения в отсутствие «свободного охлаждения» при условии оборудования отопительных приборов автоматическими терморегуляторами. Для офисного помещения доказана абсолютная экономическая эффективность прямооточных систем по сравнению со «свободным охлаждением».

Ключевые слова: системы кондиционирования воздуха, свободное охлаждение, теплоизбытки, теплопотери, воздухообмен.

Вопросы энергосбережения в зданиях в настоящее время являются весьма актуальными и рассматриваются в работах ряда авторов как отечественных, так и зарубежных, например, [1–4]. В этой связи при проектировании систем кондиционирования воздуха (СКВ) в общественных зданиях получило распространение так называемое «свободное охлаждение» в холодный период года, т.е. использование низких температур наружного воздуха для отвода теплоты от холодоносителя, обслуживающего воздухоохладители [5]. При этом холодоноситель вместо испарителя холодильной машины подается в теплообменник, установленный снаружи здания, и, таким образом, достигается экономия энергозатрат на обработку притока, поскольку исключается расход электроэнергии на привод компрессора. Однако и в данном случае предполагается, что ассимиляция теплоизбытков в обслуживаемом помещении осуществляется местными системами охлаж-

дения, у которых к тому же здесь появляется дополнительный конструктивный элемент – внешний теплообменник с соответствующим циркуляционным контуром.

В то же время в холодный период, в отличие от теплого, существует естественный источник холода – наружный воздух, который можно использовать и непосредственно, в системе приточной вентиляции. Кроме того, нужно иметь в виду, что при установке автоматических терморегуляторов у отопительных приборов, что в настоящее время является обязательным при новом строительстве, теплоотдача системы отопления уменьшается пропорционально появляющимся теплопоступлениям, поэтому до определенного момента суммарные теплоизбытки в помещении равны нулю. Поэтому в таком режиме СКВ должна выполнять чисто вентиляционные функции, и никакие дополнительные системы охлаждения не требуются. Если же расчетные теплопоступления все же оказываются больше максимальных теплопотерь, что также достаточно часто встречается, расчетные теплоизбытки при работе терморегуляторов будут значительно меньше, и для их удаления может оказаться достаточным опять-таки использование СКВ в вентиляционном режиме с пониженной температурой притока. Разумеется, на эту температуру существуют ограничения по санитарно-гигиеническим требованиям, исходя из допустимого отклонения температуры в приточной струе на ее входе в рабочую зону в соответствии с СП 60.13330.2012 «Актуализированная редакция СНиП 41-01–2003 “Отопление, вентиляция и кондиционирование”» (далее – СП 60). Поэтому возможность реализации данной схемы требует дополнительной проверки в каждом конкретном случае. Однако в случае положительного результата этим следует пользоваться, поскольку, как уже отмечалось, исключается установка дополнительного оборудования.

Рассмотрим несколько характерных примеров, позволяющих оценить обстоятельства, связанные с необходимостью «свободного охлаждения» или ее отсутствием. Вначале проанализируем ситуацию в офисных помещениях как в одном из наиболее распространенных и характерных типов объектов современного строительства. Данная задача исследовалась, в частности, в работах [6–8], хотя и преимущественно с технологической и экономической точки зрения, а непосредственно сама потребность в «свободном охлаждении» сомнению не подвергалась. Тем не менее попытаемся определить требуемое здесь снижение температуры притока $t_{\text{п}}$ по сравнению с температурой внутреннего воздуха $t_{\text{в}}$. В таких помещениях средние поступления явной теплоты от одного человека при легкой работе составляют примерно 90 Вт, от компьютера и сопутствующего оборудования – до 300 Вт, от освещения – до 40 Вт/м², или из расчета 4 м² площади на одного работника, около 160 Вт^{1,2}. Следовательно, в целом на рабочее место теплопоступления оказываются на уровне 450 Вт. Из этой величины нужно вычесть расчетные теплопотери, имея в виду действие терморегуляторов у отопительных приборов. Данную величину можно ориентировочно определить, исходя из требуемой удельной тепло-

¹ Ананьев В.А., Балусева Л.Н., Гальперин А.Д. и др. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика. М.: Евроклимат, 2000. 416 с.

² Самарин О.Д. Основы обеспечения микроклимата зданий. М.: Изд-во АСВ, 2014. 208 с.

защитной характеристики здания по СП 50.13330.2012 «Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 “Тепловая защита зданий”». Для климатических условий Москвы при отапливаемом объеме здания от 6000 до 15 000 м³ она составляет 0,15–0,20 Вт/(м³ · К). Следовательно, в соответствии с ГОСТ 30494–2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» и СП 131.13330.2012 «Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* “Строительная климатология”» (далее – СП 131) при расчетной разности температур внутреннего и наружного воздуха ($t_{в} - t_{н}$) = 18 + 25 = 43° и средней высоте этажа 3,3 м получаем от 21 до 28 Вт/м² или от 84 до 112 Вт на рабочее место. Принимая среднее значение 100 Вт, находим расчетные теплоизбытки в размере $Q_{изб.я} = 450 - 100 = 350$ Вт/чел. или $350/4 = 87,5$ Вт/м², что даже существенно больше, чем учитывалось в [6–8], т. е. около 50 Вт/м².

Если теперь иметь в виду, что требуемый расход наружного воздуха по санитарной норме $L_{сан} = 60$ м³/(ч · чел.), необходимая разность ($t_{в} - t_{п}$) составит (см. сноску 2):

$$(t_{в} - t_{п}) = \frac{3,6Q_{изб.я}}{L_{сан} c_{в} \rho_{в}} = \frac{3,6 \cdot 350}{60 \cdot 1,005 \cdot 1,2} = 17,4 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

где $c_{в} = 1,005$ кДж/(кг · К) и $\rho_{в} = 1,2$ кг/м³ – соответственно удельная теплоемкость и плотность внутреннего воздуха. Мы получили достаточно значительную величину, однако в последнее время появляется ряд данных, указывающих на то, что фактические тепловыделения от компьютеров и оргтехники существенно меньше и равны примерно 150 Вт [9]. Тогда $Q_{изб.я} = 200$ Вт / чел. или $200/4 = 50$ Вт/м², что как раз совпадает с данными [6–8], и отсюда ($t_{в} - t_{п}$) = 9,9 °С. Это уже существенно меньше и, в принципе, при таком уровне $t_{п}$ можно обеспечить необходимое воздухораспределение с выполнением условий комфортности в обслуживаемой зоне помещения. Тем более это будет справедливо, если воздухообмен в помещениях принимать выше требуемого по санитарной норме.

Заметим еще, что при отказе от использования «свободного охлаждения» можно получить не только сокращение капитальных затрат, но и определенное снижение эксплуатационных издержек на теплоту для подогрева притока из-за снижения $t_{п}$, потому что в случае, когда теплоизбытки ассимилируются отдельной системой охлаждения, обычно предполагается, что $t_{п} = t_{в}$. В рассматриваемом примере это снижение в целом за отопительный период составит [10]:

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{E}_{Т} &= z_{р} L_{сан} c_{в} \rho_{в} (t_{в} - t_{п}) z_{оп} C_{Т} / 4190000 = \\ &= 6,5 \cdot 60 \cdot 1,005 \cdot 1,2 \cdot 9,9 \cdot 205 \cdot 2101,52 / 4190000 = 479 \text{ руб/чел.} \end{aligned}$$

Здесь $z_{р}$ – среднее за неделю число часов работы вентиляционного оборудования в сутки, причем при 40-часовой рабочей неделе этот параметр можно принять в размере около 6,5 ч/сут;

$z_{оп}$ – продолжительность отопительного периода, принимаемая по СП 131 (для Москвы – 205 сут);

$C_{Т}$ – тариф за тепловую энергию по данным поставщика. В Москве на вторую половину 2016 г. эта величина равна 2101,52 руб/Гкал по данным ОАО «МОЭК». Таким образом, использование обычной системы вентиляции

или приточной СКВ для ассимиляции теплоизбытков в холодный период года вместо «свободного охлаждения» имеет абсолютную экономическую эффективность при условии подачи воздуха в объеме санитарной нормы.

В помещениях общественных зданий с массовым пребыванием людей расход приточного воздуха, как правило, принимается больше санитарной нормы. Поэтому возможность ассимиляции теплоизбытков без использования «свободного охлаждения» также значительно расширяется. В качестве еще одного примера рассмотрим помещение торгового зала площадью 1100 м^2 и высотой 4 м. В этом случае объем будет равен $1100 \cdot 4 = 4400 \text{ м}^3$, и тогда при средней кратности воздухообмена 3 ч^{-1} расчетный воздухообмен составит $L_{\text{расч}} = 4400 \cdot 3 = 13\,200 \text{ м}^3/\text{ч}$. Расчетные теплопотери также можно оценить с помощью удельной теплозащитной характеристики, которая в данном случае окажется около $0,15 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$, откуда при $(t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) = 16 + 25 = 41^\circ$ получаем $0,15 \cdot 41 \cdot 4400 = 27\,060 \text{ Вт}$. Считая, что в торговом зале один человек приходится на 5 м^2 площади, находим, что их среднее число равно $1100/5 = 220$, тогда общие теплопоступления от людей $220 \cdot 90 = 19\,800 \text{ Вт}$. Теплопоступления от освещения в данном случае можно принимать около $25 \text{ Вт}/\text{м}^2$, поэтому их суммарный уровень составит $25 \cdot 1100 = 27\,500 \text{ Вт}$, а влиянием технологического оборудования можно пренебречь, во всяком случае, при отсутствии охлаждаемых прилавков. Тогда расчетные теплоизбытки $Q_{\text{изб.я}} = 19\,800 + 27\,500 - 27\,060 = 20\,240 \text{ Вт}$, а необходимая разность $(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})$ будет равна

$$(t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) = \frac{3,6Q_{\text{изб.я}}}{L_{\text{сан}} c_{\text{в}} \rho_{\text{в}}} = \frac{3,6 \cdot 20\,240}{13\,200 \cdot 1,005 \cdot 1,2} = 4,6 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Соблюдения при этом требований СП 60 заведомо можно добиться обычными способами воздухораспределения. Отсутствие необходимости «свободного охлаждения» в подобных помещениях подтверждается и данными работы [11]. Следует, правда, иметь в виду, что полученная величина $(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})$ относится к расчетным зимним условиям в соответствии с СП 131, т.е. при температуре наружного воздуха $t_{\text{н}}$ для наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92. При более высоких $t_{\text{н}}$ теплопотери помещения будут меньше, а значит, величина $Q_{\text{изб.я}}$ при прочих равных условиях должна увеличиваться. Однако приведенные вычисления свидетельствуют, что при этом максимальный прирост в офисных помещениях может произойти не более чем в 1,4 раза, если считать, что в моменты начала и конца отопительного периода текущее значение теплопотерь составляет около 20 % от расчетного, а в торговом зале – примерно в 2 раза, но здесь изначальная величина $(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})$ существенно ниже. Кроме того, в условиях, близких к переходным, из-за значительной продолжительности светового дня, как правило, становится меньше потребность в искусственном освещении в среднем на 60–70 % (см. сноску 2), что в основном компенсирует отмеченный эффект от снижения теплопотерь. Поэтому с достаточной для практики точностью рассчитанный уровень $(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})$ можно считать постоянным в течение всего холодного периода года, а полученные реко-

мендации о возможности не использовать «свободное охлаждение» сохраняют свою силу.

Если увеличить воздухообмен сверх санитарной нормы, легко видеть, что значение $(t_v - t_n)$ будет еще ниже, а потребность в использовании «свободного охлаждения» с точки зрения обеспечения комфортности станет еще менее очевидной. Однако для окончательного решения вопроса здесь требуется уже технико-экономическое обоснование, поскольку в данном случае, наряду с сокращением затрат на теплообменники контура «свободного охлаждения», все же увеличивается стоимость приточных установок из-за роста $L_{\text{расч}}$, а среди эксплуатационных издержек также появляются два конкурирующих фактора – с одной стороны, уже отмеченное снижение расхода теплоты от уменьшения t_n , а с другой – его повышение, связанное с уровнем $L_{\text{расч}}$. При этом суммарный эффект от совместного действия данных факторов в каждом конкретном случае может быть различным, и это обстоятельство требует отдельного анализа, который предполагается осуществить в рамках дальнейших исследований по рассматриваемой теме.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шаратов В.И. О некоторых аспектах технической политики в теплоснабжении // Энергосбережение и водоподготовка. 2013. № 5 (85). С. 9–12.
2. Рымаров А.Г., Савичев В.В. Особенности работы регенеративной системы вентиляции административного здания // Вестн. МГСУ. 2013. № 3. С. 174–177.
3. Paiho S., Abdurafikov R., Hoang H. Cost analyses of energy-efficient renovations of a Moscow residential district // Sustainable Cities and Society. 2015. Vol. 14, No. 1. P. 5–15.
4. Hani Allan, Koiv Teet-Andrus. Energy consumption monitoring analysis for residential, educational and public buildings // Smart Grid and Renewable Energy. 2012. Vol. 3, No 3. P. 231–238.
5. Хомутский Ю. Режим свободного охлаждения – фрикулинг. URL: http://www.hvac-school.ru/vestnik_ano/vestnik_ano_ukc_universitet_29/rezhim_svodnogo_ohlazhdenija/ (Дата обращения: 01.12.2016).
6. Малявина Е.Г., Фролова А.А. Расчет энергетически целесообразной температуры наружного воздуха для перехода на свободное охлаждение кондиционируемых помещений // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 11–12. С. 71–78.
7. Малявина Е.Г., Фролова А.А. Экономическое сравнение вариантов перехода на свободное охлаждение кондиционируемых помещений // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 4. С. 78–83.
8. Малявина Е.Г., Фролова А.А., Силаев А.С. Энергетическая и экономическая оценка систем свободного и машинного охлаждения для кондиционируемых помещений офисов // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2014. № 1. С. 42–46.
9. Полосин И.И., Лобанов Д.В. Исследование теплопоступлений от ПЭВМ в помещение // СОК. 2013. № 10. С. 54–57.
10. Самарин О.Д. Вопросы экономики в обеспечении микроклимата зданий. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во АСВ, 2015. 134 с.

11. Кокорин О.Я., Балмазов М.В. О возможности применения режима «free cooling» в средней полосе России // Холодильная техника. 2012. № 11. С. 10–14.

Самарин Олег Дмитриевич, канд. техн. наук, доц.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Получено 21.04.17

Samarin Oleg Dmitrievich, PhD, Ass. Professor

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

ON THE EXPEDIENCY OF USING FREE COOLING IN AIR CONDITIONING SYSTEMS DURING THE COLD PERIOD OF A YEAR

The possibility of energy saving in air conditioning systems of the premises of public buildings at the expense of abandoning the use of the regime of “free cooling” is considered. The calculations permitting to determine the required temperature reduction of the influx of once-through air conditioning systems are carried out subject to the filing of the sanitary norms of the outside air for offices and at the normative air exchange in trading hall in the climatic conditions of Moscow for a cold season. It is shown that at typical levels of heat gain and heat loss in the majority of cases it is possible to provide the required level of comfort in the organization of the air distribution in the absence of “free cooling” provided equipment heaters with automatic thermostats. For office space the absolute economic efficiency of a once-through system is proved in comparison with the “free cooling”.

Key words: air conditioning systems, free cooling, heat gain, heat losses, air flow.

REFERENCES

1. Sharapov V.I. O nekotorykh aspektakh tekhnicheskoy politiki v teplosnabzhenii [On some aspects of the technical policy in the heat supply]. Energoberezhenie i vodopodgotovka [Energy saving and water treatment]. 2013. No. 5 (85). Pp. 9–12. (in Russian)
2. Rymarov A.G., Savichev V.V. Osobennosti raboty regenerativnoy sistemy ventilyatsii administrativnogo zdaniya [Features of operation of the regenerative ventilating system of the administrative building]. Vestnik MGSU [Papers of the MSUCE]. 2013. No. 3. Pp. 174–177. (in Russian)
3. Paiho S., Abdurafikov R., Hoang H. Cost analyses of energy-efficient renovations of a Moscow residential district. Sustainable Cities and Society. 2015. Vol. 14, No. 1. Pp. 5–15.
4. Hani Allan, Koiv Teet-Andrus. Energy Consumption Monitoring Analysis for Residential, Educational and Public Buildings. Smart Grid and Renewable Energy. 2012. Vol. 3, No. 3. Pp. 231–238.
5. Khomutskiy Yu. Rezhim svobodnogo okhlazhdeniya – frikuling [The regime of free cooling]. Available at: http://www.hvac-school.ru/vestnik_ano/vestnik_ano_ukc_universitet_29/rezhim_svobodnogo_okhlazhdeniya/ (Date of access: 01.12.2016).

6. Malyavina E.G., Frolova A.A. Raschet energeticheski tselesoobraznoy temperatury naruzhnogo vozdukhа dlya perekhoda na svobodnoe okhlazhdenie konditsioniruemykh pomeshcheniy [Calculation of energetically expediency external air temperature for transition to free cooling of conditioned rooms]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2012. No. 11–12. Pp. 71–78. (in Russian)
 7. Malyavina E.G., Frolova A.A. Ekonomicheskoe sravnenie variantov perekhoda na svobodnoe okhlazhdenie konditsioniruemykh pomeshcheniy [Economic comparison of options transition to free cooling of conditioned rooms]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2013.No. 4. Pp. 78–83. (in Russian)
 8. Malyavina E.G., Frolova A.A., Silaev A.S. Energeticheskaya i ekonomicheskaya otsenka sistem svobodnogo i mashinnogo okhlazhdeniya dlya konditsioniruemykh pomeshcheniy ofisov [Energy and economical estimation of the systems of free and mechanical cooling for conditioned office rooms]. AVOK. Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukhа, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika [HVAC: Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and building thermal physics]. 2014. No. 1. Pp. 42–46. (in Russian)
 9. Polosin I.I., Lobanov D.V. Issledovanie teplopostupleniy ot PEVM v pomeshchenie [The research of heat ingress from computers into a room]. SOK [Sanitation. Heating. Air conditioning]. 2013. No. 10. Pp. 54–57. (in Russian)
 10. Samarin O.D. Voprosy ekonomiki v obespechenii mikroklimate zdaniy [Problems of economics in maintenance of a building microclimate]. Moscow. 2015. 134 p. (in Russian)
 11. Kokorin O.Ya., Balmazov M.V. O vozmozhnosti primeneniya rezhima “free cooling” v sredney polose Rossii [On possibility of using the regime of free cooling in the Middle Russia]. Kholodil'naya tekhnika [Refrigeration technics]. 2012. No. 11. Pp. 10–14. (in Russian)
-

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ



УДК 711.4–112(73)

А.В. МОЛОДИН

ПЛАНИРОВКА И ЗАСТРОЙКА КРУПНЕЙШИХ ПОСЕЛЕНИЙ РУССКОЙ АМЕРИКИ ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЫ XIX ВЕКА

Часть 2

Приводятся результаты исследования градостроительного творчества русских промышленников на территории Северо-Запада Северной Америки в трех крупнейших по численности населения административных центрах Русской Америки – селение Доброго Согласия, Павловская Гавань и Новоархангельск. Разбираются этапы формирования планировочных структур этих поселений, зональная дифференциация территории. Выявляются основные градостроительные центры и оси в генеральных планах этих факторий, анализируются архитектурно-градостроительные доминанты и рассматривается естественный ландшафт как элемент формирования градостроительной структуры поселений Русской Америки.

Ключевые слова: градостроительство, Русская Америка, Аляска, США, Новоархангельск, Кадьяк, Уналашка.

Зональная дифференциация территории поселений. Зональная дифференциация территории административных центров Русской Америки выявила схожую для таких поселений структуру плана (таблица).

Особенности промысловой деятельности на территории Северной Америки под управлением Российско-американской компании (РАК), своеобразный горный ландшафт островов Аляски, а также многонациональность населения сказались на планировочной структуре крупных поселений Русской Америки. К середине XIX в. в каждом из административных центров колонии сложилось по три основных района, четко разделенных природными или архитектурно-градостроительными элементами поселения. Несмотря на соседство, они были различны по планировочному и архитектурному облику, что вносило своеобразный колорит в панораму колониального поселения.

Первый – *компанейский район*, где все сооружения находились в собственности РАК. Второй – *поселенческая слобода*, где поселенцы строили себе жилые дома и хозяйственные постройки. Третий – *индейская (туземная) слобода*, где проживало коренное население. Характерным примером четкого зонирования может стать селение Доброго Согласия на о. Уналашка,

где на узкой полоске земли, ограниченной с севера заливом Удахта, а с юга – высоким горным хребтом, было возведено русское селение. Западный, компанейский, район был четко отделен от восточного, поселенческого, городской площадью с Вознесенской церковью. Алеутская же слобода, отделенная от русской части селения ручьем, расположилась вдоль побережья залива. Такое зонирование прослеживалось на протяжении всего периода развития русских поселений, хотя районы появлялись не одновременно.

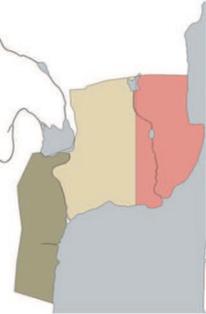
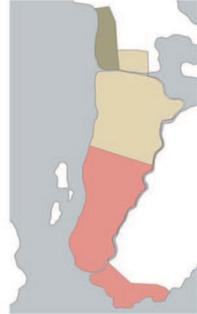
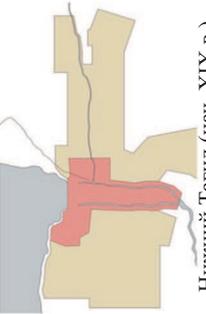
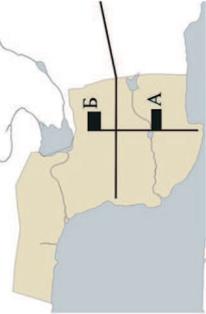
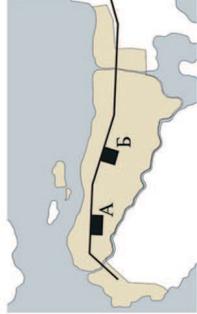
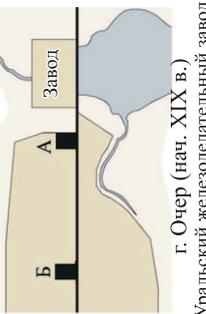
Первым во многих случаях возникал *компанейский район*, который и определял будущую структуру и направление развития поселения. Именно с закладки первых компанейских зданий – дома управляющего, магазина, казармы и первых хозяйственных построек – берут свое начало крупные поселения Русской Америки. Возникновение таких районов во многом подобно алтайским и уральским городам-заводам XVIII – середины XIX в. Несмотря на различие в производстве («железоделательная» промышленность на Урале и Алтае – пушная промышленность на Аляске), планировочная структура поселений во многом схожа.

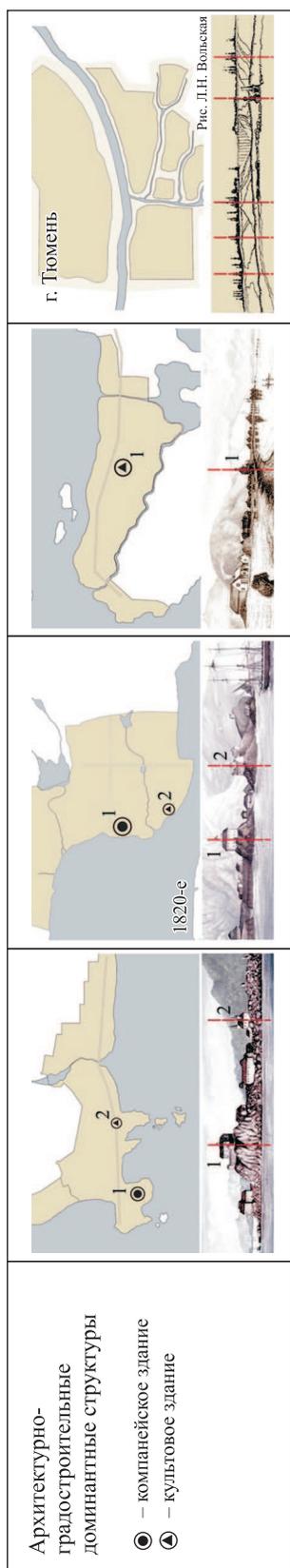
Например, история большинства городов-заводов Урала XVIII–XIX вв. таких, как Екатеринбург, Нижний Тагил, Ижевск, Очер и др., начинается со строительства производственных построек и казарм [1, с. 32], заложивших промышленные районы этих городов. Промышленная зона – рудник, где находились примечательные инженерные сооружения для добычи, подъема, обогащения руды, – была главным элементом планировочной структуры горнозаводского поселения и на Алтае в XVIII–XIX вв. Здесь находились речки с прудами, необходимыми для производственного процесса и хозяйственных нужд; крепость, имевшая в Колывано-Воскресенских заводах прямоугольную планировку с бастионами; полный набор зданий, необходимых для горнозаводских предприятий: контора, казна для денег, лаборатория, чертежная, склады провианта, офицерские квартиры. Так, в Барнауле завод оказывал значительное влияние на композиционное формирование города, став его ядром, а предзаводская площадь была центром общественной жизни [2, с. 59].

На Аляске ситуация с промысловыми поселениями повторяется. К примеру, в Новоархангельске к концу 1804 г. была выстроена крепость на кекуре, в состав которой входили дом правителя и два магазина, а в течение первой зимы – казарма и ряд хозяйственных построек. В Павловской Гавани 1792 г., подобно поселению на о. Ситка, возводятся казарма, дом правителя и склад. Эти части образуют впоследствии ядро поселения и центр общественной жизни промышленников.

Место, выбранное для строительства первых построек, определяло развитие компанейского района и всего поселения в целом. Как в Новоархангельске, так и в Павловской Гавани, удобная стоянка для судов, возвышенная над уровнем моря равнина, хорошо защищенная от ветров и паводков, были местом закладки будущих компанейских зданий. Вот как описывает К.Т. Хлебников выбранное для Павловской Гавани место: «...на возвышенном берегу, но расположено не ровно... с N стороны довольно высокая гора и много других возвышенностей; гавань составляет узкий пролив, защищаемый с моря довольно высоким островом» [3, с. 34].

Планировочный анализ поселений Русской Америки

Показатель	Новоархангельск	Павловская Гавань	Доброго Согласия	Поселения в Сибири (справочно)
<p>Формирование планировочной структуры поселения</p> <p>→ — направление развития</p>	 <p>Линейное развитие</p>	 <p>Радиально-кольцевое развитие</p>	 <p>Линейное развитие</p>	 <p>г. Иркутск (сер. XIX в.) Радиально-кольцевое развитие</p>
<p>Зональная дифференциация территории поселения</p> <p>■ — компанейский район ■ — поселенческий район ■ — слобода местных жителей</p>	 <p>Трехчастная структура</p>	 <p>Трехчастная структура</p>	 <p>Трехчастная структура</p>	 <p>Нижний Тагил (нач. XIX в.) Уральский железодельный завод ■ — завод ■ — жилая слобода</p>
<p>Основные коммуникационные каналы и общественные площади</p> <p>А — компанейская площадь Б — слободская площадь</p>				 <p>г. Очер (нач. XIX в.) Уральский железодельный завод А — предзаводская площадь Б — городская площадь</p>



Нередко заранее определяли направление развития этого района, выбирая при этом наиболее выгодные для построек места, а заболоченные низменности отводили для строительства поселенческих и туземных слобод. Развиваясь, компанейский район превращается в исторический центр поселения и становится в архитектурном плане примером для остальных. Здесь же возникает главная площадь, сформированная чаще конторским зданием, казармой, школой, библиотекой, реже церковью (как в Павловской Гавани).

Так, в Новоархангельске компанейский район представлял собой структуру, включающую исторический градообразующий центр, т.е. крепость с домом правителя на кекуре и прилегающие к ней территории, несущие оборонительную, портовую, адмиралтейскую, складскую и административную функции. Район образован комплексными компанейскими сооружениями: одно-, двух-, трехэтажными домами из тесаного бруса или же обшитыми досками, выполненными в единой манере сибирского деревянного классицизма. Всеми зданиями здесь владела могущественная Русско-американская компания. Многие сооружения в районе, границей которого служили стены средней крепости, строились как склады, арсенал, училище, мастерские и пр., а некоторые – как казармы, жилые бараки для семейных, жилые дома для офицеров и гостиницы. Кроме того, мастерские, склады частично использовались под жилье промышленников [4, с. 32]. Благодаря этому и днем, и ночью почти во всех зданиях, тем более оборонных, находились люди, а многофункциональность построек была характерной чертой зодчества Русской Америки.

Плотность застройки в этом районе Новоархангельска была невелика во все периоды его эволюции, что позволяло сохранять здания от пожаров, оставлять площадки открытыми, проходы к морю свободными и просматривать разновысокий силуэт архитектурного комплекса.

Структура Новоархангельского компанейского района повторяется и в других административных центрах Русской Америки. Так, в Павловской Гавани были выстроены церковь «очень хороша и довольно обширна» [3, с. 34], дом,

занимаемый священником, магазины, лавки, школа, ремесленные мастерские, дом правителя и «другие компанейские строения» [3, с. 35]. Из рисунков И. Вознесенского видно, что архитектурный комплекс этого района Павловской Гавани состоял из зданий, выполненных в единой манере сибирского деревянного ампира.

Несмотря на то что застройка административных центров велась без участия профессиональных архитекторов, в планировке компанейских частей крупных поселений проявляются принципы регулярной планировки эпохи классицизма, сложившиеся в сибирских городах к началу XIX в. Здания выстраиваются фасадами вдоль главной широкой улицы, образуя прямоугольные и ромбовидные площади. Следует отметить, что утвержденные генеральные планы сибирских городов начала XIX в. редко учитывали особенности природного ландшафта, в то время как планы поселений Русской Америки были во многом подчинены рельефу местности, несколько нарушающему их регулярность.

Вторым, дополняющим силуэт фактории, был *поселенческий район* или поселенческая слобода. Исторически этот район складывался обычно на несколько лет позже компанейского. Здесь строили дома русские или смешанные семьи (промышленники с женами из коренных жителей), прибывшие, в отличие от большинства промысловиков, на постоянное проживание в колонию. Заселение таких семей правление РАК пыталось начать после создания оборонительных сооружений и минимальной инфраструктуры в поселениях Русской Америки [5], чем объясняется более позднее формирование таких районов. Так, первые поселенцы были перевезены в Павловскую Гавань только через пять лет после основания этого селения на о. Кадьяк (1792 г. – основание Павловской Гавани, а в 1798 г. на новое место жительства прибывает 12 семей из 45, приехавших из Сибири в Трехсвятительскую Гавань [6, с. 321–330]).

Структура поселенческих районов административных центров Русской Америки находит свое отражение в уральских и алтайских горнозаводских городах. Здесь также вблизи исторического центра «находилась слобода для рабочих. Благодаря тому, что улицы слобод были обращены к водоему, жилая зона связываясь с водным пространством, раскрываясь в его сторону, используя рельеф местности, выглядела довольно живописно среди окружающей природы, как, например, в Змеиногорске» [2, с. 60].

На Аляске место для строительства домов поселенцев обычно определялось правлением РАК и отводилось в непосредственной близости от компанейского района, часто на низменных и худших для строительства землях. Лучшие площадки оставались для построек компании. В Новоархангельске поселенцам более четверти века приходилось жить вне крепостных стен в постоянной опасности быть атакованными враждебными местными племенами индейцев – тлинкитов. Только в начале 30-х гг. XIX столетия городская стена охватила большую часть слободы. Облик этого жилого района Новоархангельска отличался от компанейского компактностью, маломерностью элементов, ориентацией на восточный рейд. Район начал расти после 1809 г. вне стен средней крепости на месте вырубленного леса и бывших огородов. Принцип застройки этого жилого массива носил рекреационный характер. Собор Св. Михаила послужил для этого района зако-

номерным центром, направляющим развитие застройки. Разрывы между домами здесь невелики. Каждый домовладелец стремился иметь участок с хозяйственными постройками и огородами, но надворные участки были малы. На улицах укладывались деревянные мостки для пешеходов. Вдоль рейда определялась условно прямая улица, остальные, только намечаясь, плавно изгибались, что напоминает российские посады XVI–XVII вв. [7, с. 100].

Везде видно стремление к обязательному выходу одной из сторон дома на уличный фронт. Каждое строение обязательно смотрело окнами в даль океана, туда, где из-за горизонта появлялись паруса долгожданных кораблей. Это район индивидуальных домов «компанейской» или частной постройки, последняя здесь и преобладала. РАК могла купить их, например, «от приказчика или от служителя по недостатку компанейских квартир». Живописность этого района, разноликость строений определялись самобытным пониманием строителями – выходцами из разных районов России – архитектурных традиций их родины, где они впитали истоки народной мудрости.

В 1842 г. в этом жилом районе был построен двухэтажный дом русской духовной миссии (дом священника, который сохранился до наших дней). Здесь же находилась больница, лютеранская церковь и другие здания, отличающиеся естественной простотой форм и классицистическим характером, стилистически связывающим этот район с компанейским. За русский период жизни этого поселения сменились три-четыре поколения жителей, но именно этот район прочно сохранял жилые традиции далекой родины. Стереотип его компоновки около церкви Св. Михаила остался неизменным, составив единый ансамбль [7], подобный сибирским городам. Плотность застройки этого района возрастала постепенно. Население Новоархангельска было смешанным (русские, немцы, финны, алеуты, креолы) и постоянно увеличивалось. Так, в 1812 г. оно составляло 636 чел. (495 россиян), в 1836 г. – 813 (309 россиян), в 1863 г. – 1045 (468 россиян) [4, с. 138].

Третий район – *слобода местных жителей* (в селении Доброго Согласия – Алеутская слобода; в Павловской Гавани – Кадьякская слобода; в Новоархангельске – Тлинкитская слобода) – был присущ не только крупным административным центрам, но и многим другим русским поселениям на Аляске. Эта слобода была предназначена для местного населения, зависящего от русских промышленников. По традиции, сложившейся в русской колонии, основной рабочей силой при добыче пушнины было местное население, этим обосновано появление таких районов.

Этот район образовывался обычно позже остальных, что было связано с политикой, проводимой А.А. Барановым. В Новоархангельске, например, он не позволял колошам (тлинкитам) селиться даже на ближних островах. Только М.И. Муравьев, считая, что положение тлинкитского селения под самыми пушками служит лучшим залогом безопасности, дал в 1822 г. свое разрешение, которое, несомненно, способствовало установлению мирных отношений и торговли. Исключением может стать селение Доброго Согласия, где деревня местных жителей под названием Иллюлюк существовала задолго до прихода первых русских кораблей.

Планировка слободы местных жителей по обычаю коренного населения представляла собой вытянутые вдоль побережья в одну, реже в две-три линии небольших жилых построек или юрт-землянок. Здесь преобладали принципы народного зодчества индейцев, порой с явным влиянием приемов строительства цивилизованных соседей. В Новоархангельске, в Тлинкитском районе, застройка состояла из сооружений, впитавших в себя традиции сибирской клети и юрт аборигенов. Здесь прямоугольные в плане срубы с одной дверью не имели по тлинкитскому и алеутскому обычаю окон и были покрыты дерном и землей, выходом ориентируясь на море. Одноэтажная однотипная застройка располагалась вдоль берега, как бы припадая к воде. Колоши проживали здесь в количестве от 700 до 1000 чел. Вся жизнь их была связана с охотой на морского и пушного зверя, которого они продавали в крепости или меняли на жизненно необходимые товары.

Интенсивность использования территории в крепости и в индейском поселке резко различна. Специфику расположения зданий, их оформление и полное отсутствие благоустройства следует считать гримасой «колониального стиля». Большая часть домов поставлена в один ряд, плотность крайне велика, бытовых, хозяйственных, подсобных помещений нет [8]. На ночь из Новоархангельска выгоняли всех индейцев (тлинкитов), закрывали ворота, 21 орудие северной батареи было направлено в сторону индейской деревни. На холме над ней возвышалась лишь православная церковь для индейцев, выстроенная из дерева [9, р. 41]¹. В селении Доброго Согласия застройка Алеутской слободы была смешанная. Здесь наравне с традиционными жилищами местного населения можно было увидеть и сибирские клети с окнами и сенями.

Основные градостроительные центры и оси крупных поселений Русской Америки. Основные коммуникационные каналы и общественные площади выделяются в структуре поселения как композиционно-планировочная ось, отражают общие планировочные свойства поселения и характер его развития. Формирование главных улиц административных центров Русской Америки, служащих композиционными осями поселения, неразрывно связано с оформлением планировочной структуры двух главных районов (см. таблицу). Исторически сложившаяся структура компанейского района, чаще линейное расположение поселения (Новоархангельск, селение Доброго Согласия и т. п.) вдоль береговой линии, и последовательность возникновения районов предопределили протяженность главной улицы параллельно берегу залива.

Нередко русские строители городов Сибири XVII в. прибегали к практике линейного расположения улиц. Это, естественно, получалось при условии, отмеченном еще Павлом Алеппским, посетившим сибирские поселки XVII в.: «Все дороги проходят через середину городов, причем путешественник вступает в одни ворота и выезжает в другие, а потайных дорог мимо города и вовсе нет» [10, с. 11]. На примерах Илимска и Селенгинска видно, как их посады растянулись вдоль берега и параллельной ему дороги. Этот прием отражен и в более поздних аляскинских поселениях, несмотря на отсутствие

¹ Во время нападения на Новоархангельск в 1855 г. тлинкиты захватили эту церковь и открыли огонь по городу.

проезжих дорог. Формирование центральной оси носило здесь больше искусственный характер, она исполняла роль объединения двух районов поселения – компанейского и поселенческого. Так, намеченная с первых лет существования Новоархангельска главная улица, а также «зажатость» участка между высокими горами острова и береговой линией залива предопределили линейное развитие планировочной структуры поселения. Главная улица протянулась с запада на восток, объединив два главных района. Хотя планировка Новоархангельска первоначально не отличалась жесткой продуманностью, в процессе поэтапного формирования фактории с годами сложилось единое стилистическое и композиционное целое с опорой на ключевые элементы застройки поселения. Исключением может стать Гавань Св. Павла на о. Кадьяк, где определенная при начальном формировании поселения ось главной улицы не раз передвигалась в процессе роста фактории, играя роль градостроительного элемента, разделяющего два главных района поселения. Стоит отметить, что Павловская Гавань имела еще одну важную, расположенную перпендикулярно главной, ось, объединяющую собой две площади – компанейскую и посадскую.

Сибирские города XVII в., ведущие свое происхождение от острога, имели прямоугольную или приближенную к ней сеть улиц. При строительстве учитывались особенности ландшафта, рельефа местности, ее топографии, которые сказывались на прямолинейности центральных улиц. В связи с этим планировка получалась довольно живописной, элементы ландшафта включались активно в структуру, придавая городу неповторимость и образуя богатство визуальных перспектив [2, с. 34]. Более века спустя, в период внедрения четких регулярных принципов в градостроительстве Сибири, планировка поселений Русской Америки, а соответственно, и главных ее осей, повторяет отошедшую практику связывать уличную сеть с рельефом местности, что сказывалось на ее прямолинейности. Застройка многих сибирских и уральских поселений к концу XVIII – началу XIX в. вышла за пределы первоначальных границ и стала располагаться в направлениях, удобных для жилищного строительства, и, как следствие, нарушается регулярность таких улиц. К примеру, отсутствие планов развития городов-заводов Урала во второй половине XVIII в. приводило к хаотичной застройке, особенно на новых территориях. Принцип линейного построения жилых порядков соблюдался лишь в самых общих чертах. Некоторые заводы, возникающие в это время, вообще не имели никаких планов, например, пос. Чермозского завода, основанного в 1761 г. Недаром в предписании Соликамского земского суда от 12 мая 1824 г. отмечалось, что в планировке и застройке его «... вот уже 60 лет безобразии» [1, с. 150–151].

Немаловажным градостроительным элементом в структуре любого поселения являются площади – центры социальной, политической и религиозной деятельности населения. Без таких планировочных образований, которые обычно располагались на главной оси поселения, не обошлись и крупные поселения Русской Америки.

При закладке первых сооружений особое место уделялось площадям, образованным важными административными объектами. Так, на плане Павловской Гавани (см. [11, рис. 2]) первая «компанейская» площадь была ограничена Воскресенской церковью, офицерской казармой, магазином и до-

мом главного правителя, исполнявшим роль конторы на раннем этапе развития селения. На площади также располагался «бюст государя». В Новоархангельске и селении Доброго Согласия первая площадь также была ограничена важными административными постройками такими, как контора, офицерская казарма, магазин, дом правителя и т. п.

При возникновении поселенческой слободы начинает формироваться вторая площадь – слободская, с церковью (исключая Павловскую Гавань, где культовое здание находилось на заводской площади), являющейся архитектурно-градостроительным элементом и разделяющей два района. Нередко площадь выполняла торговую функцию. Таким образом, в большинстве административных центров возникают две площади – первая компанейская, образованная важными административными объектами, вторая – слободская, ограниченная церковью и другими важными социальными постройками такими, как торговые лавки, салоны и т. п. Стоит отметить, что в уральских городах-заводах рубежа XVIII–XIX вв. ситуация во многом повторяется. Так, Н.С. Алферов, описывая такие поселения, отмечает, что «площади обычно были “нанизаны” на главную магистраль, и число их было не более двух. Так, например, в Очере было две площади – одна предзаводская, с церковью, другая – на значительном расстоянии от завода – торговая. Здесь располагались склады, торговые ряды и другие, социально значимые здания» [1, с. 161].

Архитектурно-градостроительные доминанты. Архитектурно-градостроительные доминантные структуры представляют собой систему пространственных элементов, фиксирующих композицию селений. Художественно-образная характеристика любого населенного пункта наиболее полно и ярко отражается в его силуэте, панораме, придающих ему неповторимость, запоминаемость и являющихся главными «ингредиентами» архитектурно-пространственной композиции. Это особенно выявляется в приморских поселениях, где их панорама воспринимается наиболее полно со стороны часто единственного водного подхода.

Силуэт исторического города формируется в зависимости от особенностей ландшафта и рельефа местности, планировочно-пространственной структуры, его величины и значимости. Исторически сложившийся силуэт города в своей неповторимости всегда служил своеобразной визитной карточкой поселения. К примеру, силуэт Санкт-Петербурга с иглой Адмиралтейства и шпилем Петропавловского собора; Венеции с кампанилой Сан-Марко; Рима с мощным куполом собора Святого Петра – делают эти города вечно узнаваемыми, запоминающимися своим высоким художественным строем.

О силуэтах вертикальной композиции русских поселений Северной Америки можно судить по панорамам – гравюрам XVIII–XIX вв., оставленным художниками-путешественниками прошлого, так как фактически вся застройка периода присутствия русских на Аляске уничтожена во времена американского правления.

Доминанты в линейной планировочной структуре поселений Русской Америки господствовали на наиболее выигрышных участках, парили в пространстве, вырастая как бы из сложного рельефа местности, контрастируя с малоэтажной застройкой. Важнейшей особенностью пространственно-пла-

нирочной композиции с такой структурой является «контраст вертикального и горизонтального движений. Компонентами этих движений в композициях являются как ландшафтные (растительность, холмы, горы, водоемы), так и архитектурные (малоэтажная, плотная жилая застройка, стены и башни крепостей, колокольни храмов)» [2, с. 73].

В сибирском градостроительстве, как и в древнерусском, большую роль играет акцентирование природных осей рельефа, точнее его элементов, а так как города возникали на крупных речных артериях в основном на высоких надпойменных террасах, связь рельефа и реки была органичной [12, с. 3]. Прием противопоставления высотных элементов мощному горизонтальному пространству, реке очень выразителен в сибирских городах и в композиционном, и в эстетико-художественном отношениях, благодаря чему эти города так непохожи и примечательны своей композицией. Архитектурные доминанты – вертикальные элементы – являлись выразительными акцентами, занимая выигрышные места на рельефе. Благодаря этому приему, формирующему «речной фасад» города, они создавали приречные ансамбли и всю композицию, складывающую неповторимый силуэт города [2].

Этим приемом искусно воспользовались строители русских поселений в Северной Америке, выбирая наиболее высокую точку для строительства компанейского сооружения, имеющего большую значимость для поселения. В Новоархангельске таким сооружением стал дом главного правителя на высоком кекуре, выстроенный в 1837 г. Сосредоточивая на себе деловые интересы колонистов, главный дом столицы величаво возвышался над всеми постройками, привлекая к себе внимание в общей панораме поселения. Создавая мощную вертикальную доминанту в контраст горизонтальному движению плотной малоэтажной застройки и водной глади залива, дом главного правителя был не единственным архитектурным элементом, создающим вертикальный акцент. Второй, хотя и менее значимой доминантой стал Михайловский собор на слободской площади.

Ситуация повторяется и в Павловской Гавани, где на высоком холме, раскрывающемся к заливу, была выстроена двухэтажная казарма, ставшая явным вертикальным композиционным акцентом поселения. Впечатление усиливалось за счет высокой «маячной будки» и флагштока на крыше казармы. Подобно Новоархангельскому Михайловскому собору, Воскресенская церковь на о. Кадьяк со своей колокольней и куполом кафоликона стала второй по значимости вертикальной доминантой поселения. Следует отметить, что и в Новоархангельске, и в Павловской Гавани мирские компанейские дома были расположены выше церковных строений. Такое решение являлось новым для архитектурно-композиционного построения русского поселения. Неудивительно, что, попадая в новую среду, некоторые идеи русского народного зодчества подверглись радикальной творческой переработке. Правители РАК, субсидировавшие строительство храма, как бы невольно подчеркивали преобладание власти светской (в данном случае колониальной) над духовной, что разнилось с теорией, распространенной в Сибири.

Исключением становится селение Доброго Согласия, где единственным противопоставлением горизонтальной оси малоэтажной застройки

и водного пространства залива становится культовое здание – Вознесенский собор.

Естественный ландшафт как элемент формирования градостроительной структуры поселений Русской Америки. Элементы естественного ландшафта являются наиболее устойчивым естественным комплексом в структуре поселения, оказывающим постоянное и значительное влияние на формирование его планировочной композиции. Градостроительство Аляски связано с возникновением административных поселений, дислоцированных в наиболее благоприятных в ландшафтном отношении местах. Такие поселения чаще размещались по берегам заливов, удобных для стоянки судов. Большая часть территории Аляски – горные районы, чередующиеся с относительно плоскими долинами крупных рек. Характерная черта рассматриваемой территории – многочисленные озера и заболоченные низины. Важно отметить, что северо-западное побережье Северной Америки изобилует многочисленными гористыми по характеру островами, на которых нередко размещались административные центры Русской Америки.

Близкорасположенные к воде горные хребты, часто проходящие параллельно береговой линии залива, во многом предопределили линейное развитие административных центров русской колонии в Северной Америке. Характерным примером здесь может выступить селение Доброго Согласия, где на узком плоском участке суши, ограниченном с юга высоким горным хребтом, а с севера береговой линией залива Удахта, сложился административный центр Уналашинского отдела РАК, протянувшийся параллельно горному хребту. Подобные очертания плана получил Новоархангельск, ограниченный с севера Верстовой горой (название было получено благодаря высоте относительно моря), а с юга заливом. Последний во всех случаях являлся важным фактором притяжения портовых поселений, подобно водным и транспортным путям Сибири. Именно залив часто был единственной транспортной артерией, через которую осуществлялась связь с «матерной землей». Эта особенность прослеживается во всех административных центрах Русской Америки.

Нетрадиционный для Сибири горный ландшафт и широкие просторы морских заливов формировали специфический для колониальных поселений художественный образ. Градостроительная эстетика Новоархангельска, его пространственная структура сложились благодаря трем составляющим: ландшафту, создающему задний фон горными хребтами, рядовой малоэтажной застройке, подчеркнутой горизонтальным зеркалом водных пространств, и вертикальным архитектурно-градостроительным доминантам, создающим узнаваемый образ поселения.

Эстетические ценности поселений Русской Америки несомненны. Здесь прослеживается связь строительной деятельности колонистов с уникальной природой, осмыслением ландшафта. Строители очень умело использовали рельеф для усиления значимости доминант, располагая их на возвышенных участках рельефа. Так, дом главного правителя в Новоархангельске был выстроен на кекуре, а казарма Павловской Гавани расположилась на высоком холме на берегу залива.

В силу природно-климатических условий в российских колониях, а также их расположения на берегу морского залива, где соленая вода была непригодна к употреблению в пищу, небольшие пресноводные реки занимали особое место в жизнеобеспечении поселений. При выборе места для новых факторий этому уделялось особое внимание. Так, в селении Доброго Согласия поселок расположился недалеко от природного пресноводного водохранилища, вдоль небольшой реки. Новоархангельск в ходе своего развития пересек две поймы пресноводных рек Канавки и Малышовки. Поселение Павловская Гавань, как и Уналашкинское, имело большое природное водохранилище и, подобно Новоархангельску, пропускало через свою территорию две пресноводные реки. Имея важное значение для поселения, такие водоемы не могли не оказывать влияние на формирование планировочной и композиционной среды фактории. Так, на Уналашке пойма реки, наряду с горным хребтом и береговой линией залива, предопределила главную ось развития селений, в Павловской Гавани и Новоархангельске одна из рек являлась природной границей фактории, сдерживая долгое время территориальное развитие поселения.

Выводы. Этапы формирования планировочной структуры крупнейших административных центров были различны по характеру и времени их проведения. Павловская Гавань пережила два этапа бурной строительной деятельности. Первый этап относился ко времени ее закладки – 90-е гг. XVIII столетия, второй к 20–30-м гг. XIX в., когда правление РАК планировало свой перенос с о. Ситка на о. Кадьяк. Развитие Новоархангельска было планомерным, хотя территориальный его рост зависел от расширения крепостных стен в 1808, 1834 и середине 40-х гг. XIX столетия. Селение Доброго Согласия формировалось так же, как и Павловская Гавань, в два этапа. Первый – развитие компанейского района в 20-е гг. XIX в., второй – формирование поселенческой слободы в 30–40-е (см.: [11, рис. 3]).

Несмотря на большие различия в процессах формирования поселений, во всех административных центрах выявляется четкое зонирование на три различных района – первый – компанейский район, где все сооружения находились в собственности РАК; второй – поселенческая слобода, где поселенцы строили себе жилые дома и хозяйственные постройки; третий – индейская (туземная) слобода, где проживало местное население (см. таблицу).

Линейное развитие населенных пунктов во многом предопределило и формирование главных улиц факторий. Несмотря на то что строители крупнейших административных центров Аляски пытались применить в планировке регулярную систему, сложившуюся к началу XIX в. во многих городах Сибири, они уделяли большое внимание естественному ландшафту, что не могло не влиять на формирование сетки улиц этих поселений. Примечательно, что как в Павловской Гавани, так и в Новоархангельске и селении Доброго Согласия, подобно уральским и алтайским городам-заводам, образуются две площади – компанейская и слободская, являющиеся центрами соответственно компанейского и поселенческого районов.

Большое внимание промышленники уделяли и архитектурным доминантам, придающим поселению неповторимость, запоминаемость и являющимся главными ингредиентами архитектурно-пространственной композиции.

В поселениях Русской Америки ими были вертикальные элементы, ставшие выразительными акцентами, занимавшими выигрышные места на рельефе. Так, в Новоархангельске такими доминантами являлись дом правителя на кекуре и Михайловский собор, в Павловской Гавани – казарма и Воскресенская церковь, на Уналашке – Вознесенская церковь.

Продолжение исследований. В данной работе был рассмотрен короткий период градостроительной деятельности русских промышленников на территории Аляски. Исследование было ограничено 1867 г., когда Русская Америка была продана Соединенным Штатам. Начиная с этого года, территориями начинают управлять сначала военные, а затем гражданские власти США. Они принесли новые для этих мест градостроительные традиции, которые постепенно начали внедрять на уже выстроенную русскими инфраструктуру. В будущих исследованиях мы предполагаем рассмотреть взаимосвязь градостроительной деятельности американских пионеров и русских промышленников в послерусский период Аляски.

Немаловажным вопросом градостроительной деятельности на территории Аляски также является строительство поселений местных эскимосов и индейцев. Градостроительные традиции коренного населения могли оказывать влияние на формирование планировочных принципов русских поселений (прежде всего слобод местных жителей). Поиск обозначенных связей также может стать основой будущих исследований этого направления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алферов Н.С. Зодчие старого Урала. Свердловск: Урал. рабочий, 1960.
2. Вольская Л.Н. Градостроительное наследие Сибири. Новосибирск, 1996.
3. Хлебников К.Т. Русская Америка в неопубликованных записках. Л.: Наука, 1979.
4. Тихменев П.А. Историческое обозрение образования Российско-американской компании и действий ее до настоящего времени. СПб., 1863. Ч. 2.
5. Обозрение состояния и действий Российско-американской компании с 1797 по 1819 год // Архив внешней политики Российской империи. Ф. РАК. Д. 288. Л. 7–87.
6. Исследования русских на Тихом океане в XVIII – первой половине XIX в.: сб. док. / редкол.: А.Л. Нарочницкий (гл. ред.) и др. М., 1984. Т. 2.
7. Соловьева Катерина. Столица русской Америки // Архитектура СССР. 1991. № 2, март-апрель.
8. Отчет Главного правления Российско-американской компании за 1840–1841 гг. // Архив внешней политики Российской империи. Ф. РАК. Д. 445. Л. 1153–1285.
9. Elliot H.W. Our Arctic Province Alaska and the Seal Islands. New York, 1906.
10. Алеппский Павел. Путешествие антиохийского патриарха Макария в Москву в XVII веке. СПб., 1893.
11. Молодин А.В. Планировка и застройка крупнейших поселений Русской Америки первой половины XIX века. Часть 1 // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 4. С. 48–62.
12. Кудрявцев М.И. Использование рельефа местности на примере градостроительства Москвы XVII в. М., 1973.

Молодин Александр Владимирович, канд. архитектуры, доц.;
E-mail: avmolodin@gmail.com
Университет Джорджа Вашингтона, Колумбийский колледж искусств и наук, США

Получено 24.04.17

Molodin Alexandr Vladimirovich, PhD, Ass. Professor; E-mail: avmolodin@gmail.com
The George Washington University, Columbian College of Arts & Sciences, USA

TOWN PLANNING OF BIGGEST SETTLEMENT OF RUSSIAN AMERICA IN FIRST PART OF XIX CENTURY

Part 2

This article contains results of researching about town-planning activity of Russians on territory of Northern-East of North America continent. Three settlements was reviewed – Dobrogo Soglasiya (Unalashka), Pavlovsk harbor (Kadiak), Novoarchangelsk (Sitka). Author showing phase of towns' development, zone differentiation in article. He detect main town-planning centers and axes in master plans of settlements. Author review landscape as one of the factor of formation of plans structures of towns of Russian America.

Key words: town planning, Russian America, Alaska, USA, Novoarkhangelsk, Kadyak, Unalashka.

REFERENCES

1. Alferov N.S. *Zodchie starogo Urala* [Architects of old Ural region]. Sverdlovsk, 1960. (in Russian)
2. *Volskaya L.N. Gradostroitel'noe nasledie Sibiri* [Urban planning history of Siberia]. Novosibirsk, 1996. (in Russian)
3. *Khlebnikov K.T. Russkaya Amerika v neopublikovannykh zapiskakh* [Russian America in unpublished notes]. Leningrad, 1979. (in Russian)
4. *Tichmenev P.A. Istoricheskoe obozrenie obrazovaniya Rossiysko-amerikanskoj kompanii i deystvii ee do nastoyashchego vremeni* [Historical overview of foundation of Russian-American Company and its activity till present time]. Saint Petersburg, 1863. P. 2. (in Russian)
5. *Obozrenie sostoyaniya i deystvii Rossiysko-amerikanskoj kompanii s 1797 po 1819 god* [Overview of and activity of Russian-American Company since 1797 till 1819]. *Arkhiv vneshney politiki Rossiyskoj imperii* [Archive of Foreign Policy of the Russian Empire]. Fond RAC. File 288. Pp. 7–87. (in Russian)
6. *Issledovaniya russkikh na Tikhom okeane v XVIII – pervoy polovine XIX v.: sbornik dokumentov* [Russian discoveries in Pacific Ocean in 18th – first half of 19th century, edited by A. Narochnitsky and others]. Moscow, 1984. Vol. 2. (in Russian)
7. *Solovjova Katerina. Stolitsa russkoj Ameriki* [The Capital of Russian America]. *Arkhitektura SSSR* [Architecture of USSA]. 1991. No. 2. (in Russian)
8. *Otchet Glavnogo pravleniya Rossiysko-amerikanskoj kompanii za 1840–1841 gg.* [Report of Head office of Russian-American Company for 1840–1841]. *Arkhiv vneshney politiki Rossiyskoj imperii* [Archive of Foreign Policy of the Russian Empire]. Fond RAC. File 445. Pp. 1153–1285. (in Russian)
9. *Elliot H.W. Our Arctic Province Alaska and the Seal Islands.* New York, 1906.

10. Alep sky P. Puteshestvie antiokhiyskogo patriarkha Makariya v Moskvu v XVII veke [Voyage of Patriarch of Antioch Makary in 17th century]. Saint Petersburg, 1893. (in Russian)
 11. Molod in A.V. Planirovka i zastroyka krupneyshikh poseleniy Russkoy Ameriki pervoy poloviny XIX veka. Chast' 1 [Town planning of biggest settlement of Russian America in first part of XIX century. Part 1]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 4. Pp. 48–62. (in Russian)
 12. Kudriavcev M.I. Ispol'zovanie rel'efa mestnosti na primere gradostroitel'stva Moskvy XVII v. [Using the landscape in example of town planning of Moscow in 17th century]. Moscow, 1973. (in Russian)
-

УДК 728.37(571.1)

А.П. ГЕРАСИМОВ

**ЗАПАДНОЕВРОПЕЙСКИЙ МОДЕРН
И НЕОРОМАНТИЧЕСКИЕ ТЕНДЕНЦИИ
В ДЕРЕВЯННОЙ АРХИТЕКТУРЕ СИБИРСКИХ ГОРОДОВ**

Данная статья посвящена стилю модерн в деревянной архитектуре Западной Сибири начала XX столетия. В крупнейших городах Западной Сибири этого периода были успешно апробированы «новые» строительные материалы – природный камень, кирпич, железобетон. Однако традиционное «живое» дерево по-прежнему пользовалось огромным спросом как в жилых, так и в общественных, культовых постройках. В статье исследуются отличительные признаки западноевропейского стиля модерн и его интерпретации в деревянных жилых особняках города Томска. Отмечено стремление томских архитекторов и гражданских инженеров следовать «передовым» требованиям своего времени. Результаты творческих поисков, в частности, были воплощены в архитектуре их личных особняков, выполненных в «новом стиле». Этот аспект в деревянном зодчестве Западной Сибири изучен недостаточно и требует дальнейших исследований.

Ключевые слова: стили и направления в архитектуре, деревянная архитектура Сибири, модерн.

Культура рубежа XIX–XX вв. непосредственно связана с ростом промышленности и технизацией производства и общества. Западноевропейский стиль модерн дал мощный импульс развитию архитектуры и градостроительства Российской империи этого периода: «Архитектура самым тесным образом связана со всей жизнью данной эпохи. Все в архитектуре – от предпочтения, отдаваемого определенным формам, до выбора определенных архитектурных заданий – отражает условия времени, к которому она относится...», – писал исследователь архитектуры XX столетия Зигфрид Гидион [1, с. 35]. Искусствовед В.И. Тасалов, раскрывая эстетические взгляды конца XIX – начала XX в., отмечал, что «борьба против орнамента и эклектического стилизаторства опиралась на неодолимое развитие современного типа механизированной промышленности. Выдвигаемые ею условия материализовались на рубеже XX века и в машинах, и в технологии производства вещей, и в самих выразительных обликах индустриальных объектов. Бурное строительство больших промышленных предприятий, весьма ощутимо отличавшихся своими масштабами и своим индустриальным пафосом от мелких фабрик старого индивидуалистического капитализма, ставило перед глазами инженера, архитектора и художника, как зримую реальность, источники и аргументы нового формотворческого вдохновения. Многие видные архитекторы привлекались к промышленному строительству; художники, если и не находили пока что заметного спроса в новом конструировании вещей, чутко откликались на “зов” новой формы. Эмоциональное приятие этих требований как решаю-

шего морального императива для принципов нового художественного формообразования вещей характеризует на рубеже веков деятельность представителей “Нового движения”: Отто Вагнера, Адольфа Лооса, Генри ван де Вельде, Петера Беренса, Ганса Пёльцига и других...» [2, с. 77].

Одновременно решались вопросы освоения новых строительных материалов, создания новых форм и конструкций. Художественная жизнь этого периода отличалась той сложностью и противоречивостью, которая дала небывалый расцвет во всех сферах искусства, порождая все новые стили и направления в искусстве. Художественные силы, тяготевшие к академизму или критическому реализму в живописи, к историзму в скульптуре и архитектуре, все чаще обращаются к новым формам выражения. Появляются течения, выдвигающие в качестве новой программы отказ от реалистического познания мира. Начиная с 1890-х гг., все сильнее заявляет о себе «новое искусство» – модерн и символизм. От Рихарда Вагнера в музыке до Отто Вагнера в архитектуре, от литературных произведений «Манифеста символизма» Жана Мореаса и произведений «Вести ниоткуда», или эпохи спокойствия Уильяма Морриса и его «Красного дома» до «Манифеста футуристической архитектуры» Филиппо Маринетти; от Мамонтовского абрамцевского кружка до архитектуры Ф.О. Шехтеля и Ф.И. Лидваля, от музыки А.Н. Скрябина до живописи Н.К. Рериха – время рождения и воплощения новых идей в искусстве. Модерн, как новое направление в культуре, в большей степени связан с синтезом всех видов искусств, который объединил художников, скульпторов и архитекторов.

«Новый стиль» в русле национально-романтических тенденций родился почти одновременно как в Западной Европе, так и в России. Сторонники «нового стиля» в архитектуре, отказываясь от основных стилевых принципов, искали новые пути формообразования, все больше обращаясь к нестандартным, оригинальным приемам декоративного оформления фасадов зданий и интерьеров. Материал, как формообразующий фактор в концепции эклектики и модерна, играл одну из решающих ролей. Зародившись, как стиль в каменном зодчестве, модерн одновременно развивается в железобетоне и дереве. Наибольшее воплощение деревянный модерн получил в странах Скандинавии, Финляндии, Польше и России. В.С. Горюнов и М.П. Тубли сводят это направление в архитектуре в особую группу. По их мнению, оно опиралось «на традицию рубленого дерева крестьянского жилища». Применение общей для архитектуры этих направлений конструкции бревенчатого сруба создавало определенную стилистическую общность. Этому же способствовала характерная для неоромантического направления модерна идеализация «народной» (примитивной) простоты.

Следует отметить, что стилистика рубленого дома легко эмансипировалась от тех весьма специфических условий, которыми она была порождена. Свидетельство тому – многочисленные выставочные павильоны северных европейских стран, в том числе и России, выполненные с применением бревенчатого сруба [3].

Интерес архитекторов Сибири к воплощению модерна в дереве проявился в поисках ими новых композиционных решений, где все большее значение стало придаваться ритму, а не традиционной зеркальной симметрии. Максимально раскрывается художественный потенциал фактуры дере-

ва различных пород, широко применяются монтажные технологии «открытого сруба». Существенно возросла роль «декоративного угла», формы которого становятся все массивнее и постепенно превращаются в естественные «продолжения» конструктивных деталей. Это видно в оформлении фронтонов, карнизов и наличников. Зато уменьшилась роль фриза. Кронштейны, если они есть, чередуются с удлиненными подзорами. Архитекторы подходят к своим проектам с индивидуальных позиций, создавая новые объемно-пространственные решения зданий и, параллельно с этим, оригинальные варианты орнамента. Более всего это заметно в архитектуре жилых особняков. Постепенно создатели «сибирского модерна» отходят от использования народных и национальных форм и черт в архитектуре.

В особняке купца А.Ф. Громова на ул. Герцена, 46 (ул. Александровской, 44) (рис. 1) еще используется русский орнамент в оформлении фриза и сандриков наличников, но объемно-пространственное решение дома, кружевные формы орнамента в тимпанах главного фасада свидетельствуют о новом этапе в развитии деревянной архитектуры. Особняк купца А.Ф. Громова, по некоторым данным, был построен в 1911 г. художником-архитектором В.Ф. Оржешко (1876 – после 1917 г.). Сочетание геометрического и растительного орнаментов, оформление тимпана главного фронтона «трезубцем», решение фриза и на-



Рис. 1. Томск. Особняк на ул. Герцена, 46 (ул. Александровская). Начало XX в. Фото автора, 1996 г.

личников в виде сандриков, их индивидуальный рисунок раскрывают региональные особенности «деревянного модерна».

Если в особняке А.Ф. Громова композиционный центр смещен за счет разномасштабности щипцовых крыш, то особняк на ул. Вершинина, 12 (ул. Торговая) (рис. 2) имеет четкие симметричные формы, с размещением

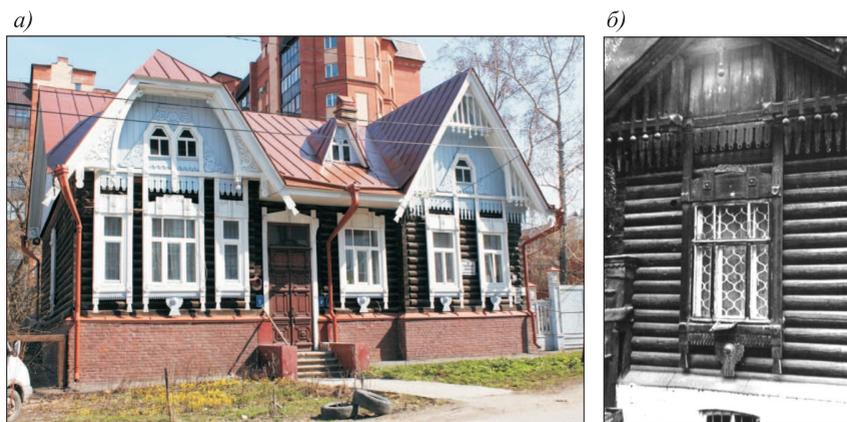


Рис. 2. Томск. Особняк (фото автора 2016 г.) (а) и фрагмент главного фасада (б) собняка на ул. Вершинина, 12 (ул. Торговая). Начало XX в. Фото автора, 1995 г.

парадного входа в центре здания. Асимметрия, характерная для модерна, выражена в различном конструктивном решении кровли. Своеобразно исполнены фронтоны. Разнообразие находим и в оформлении наличников. Открытый сруб особняка делает его более живописным и нарядным, подчеркивая контрастность и выразительность одного и того же материала – дерева. Главный фасад особняка своим объемно-планировочным решением похож на особняк В. Гудовича в Царском Селе.



Рис. 3. Томск. Дом на ул. К. Маркса, 31 (ул. Духовская). Архитектор П.Ф. Федоровский. 1913–1914 гг. Фото автора, 2008 г.

Эволюция развития архитектуры модерна в Томске проходила почти в той же последовательности, что и в других городах Сибири. Она заключалась в преодолении тенденции романтизма и усилении рационализма. Рационализм, как одно из направлений в архитектуре, зародился во второй половине XIX в. и получил дальнейшее развитие в эпоху модерна. Дом Н.Д. Родекова на ул. К. Маркса, 31 (ул. Духовская) ближе стоит к «раннеромантическому декоративному», чем «рациональному модерну» (рис. 3). Здесь так же, как и в особняке на ул. Вершинина, открытый сруб, который архитектор П.Ф. Федоровский (рис. 4) использовал в своем проекте как фон, хорошо выявляет линию наличников с удлиненными подоконными досками верхнего этажа. Фриз, состоящий из кронштейнов, усложнен орнаментальными вставками – «метопами» и расположенными между ними «триглифами» в виде укороченных подзоров, опирающихся по всему периметру на «линию архитрава» [4].

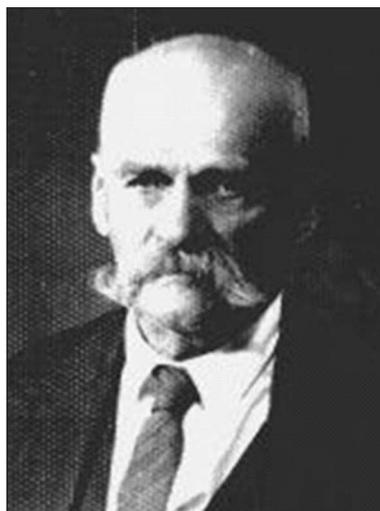


Рис. 4. Архитектор П.Ф. Федоровский (1864–1944). Фотография из архива Н.П. Крадина

Левая часть главного фасада дома с большим, в два этажа, окном лестничной клетки уравнивается фронтоном и центральным балконом. Членение объема по центральной оси фронтоном, фриз, переходящий в подзоры, асимметрия оконных проемов – характерные черты регионального модерна. Творческий подход к оформлению дома, использование своеобразного орнамента на фасадах здания, строгих наличников первого этажа и крупного рисунка обрамления второго говорят о профессиональном таланте мастера, создавшего этот дом.

Деревянная архитектура городов Сибири рубежа веков представляет собой наиболее сложное и, в то же время, интересное явление. Рост городов за счет переселенцев из Центральной России, строительство Великой Сибирской железной дороги, учебных заведений и образование Западно-Сибирского учебного округа благоприятно повлияли на архитектуру сибирских городов. Одновременно происходило формирование городов как купеческих и торговых центров. Застраивая города быстрыми темпами, архитекторы использовали, помимо опыта Санкт-Петербурга и Москвы, и западноевропейский опыт. Возвращаясь к классификации деревянных построек, необходимо отметить, что для общего понимания развития архитектуры конца XIX – начала XX в. это – необходимость, которая помогает нам понять и разобраться в последовательности развития деревянного как народного зодчества, так и профессионального домостроения: «Возникновение сходных явлений в архитектуре различных, часто весьма отдаленных друг от друга стран и регионов, не может быть объяснено только взаимным влиянием. Этот параллелизм свидетельствует о внутренней закономерности, определенной логике, порождающей сходные теоретические

установки и стилистические приемы. Причем логика эта неоднозначна, она допускала существование большого числа альтернативных направлений в решении общей задачи. Определение альтернатив, развития новаторских направлений архитектуры конца XIX – начала XX в. и означает создание их научной классификации» [5, с. 54]. Тем более, что это касается архитектуры модерна, где индивидуальные проекты играли определяющую роль. В.С. Горюнов и М.П. Тубли, рассматривая архитектуру модерна, относят все постройки из дерева к одному из течений модерна – неоромантическому; Е.И. Кириченко рассматривает деревянную архитектуру Томска с позиции народного искусства и «русского стиля», т.е. «национально-романтического» [6].

Что касается Томска, то мы писали о причинах возникновения данного направления: «Причины, которые характеризуют возникновение деревянного модерна в регионах, где обилие лесов – относительно дешевого строительного материала на огромном протяжении территории России, включая не только Европейский Север, но и Урал, территории Западной, Восточной Сибири и Дальнего Востока, способствовали строительству деревянных построек в этом стиле. Общность строительных традиций и общность духовной и материальной культуры русского народа сформировали определенный комплекс сходных черт в архитектуре деревянных домов, но это не исключает появления и развития местных региональных вариантов стиля. Развитие промышленности и техники дало новые средства для обработки древесины, которые существенно повлияли на конструктивные особенности и декоративное оформление деревянных построек. Массовость применения дерева в городах России и, в частности в Сибири, дает нам основание рассматривать деревянные постройки всех категорий как профессиональные, тем более что к ним все больше обращались архитекторы России второй половины XIX – начала XX в. Рассматривая развитие деревянного зодчества этого периода, следует отметить, что исторически сложившиеся города Сибири имели в своем большинстве массовую деревянную застройку, включая целые кварталы. Картина была бы также не полной, если бы не были освещены те моменты, которые влияли на формирование деревянного дома. Специфика дерева как строительного и отделочного материала властно определяла стилистику деревянных домов эпохи модерна. С другой стороны, архитектура города не могла не отразить тех влияний, которые шли от “столичной” и местной каменной архитектуры. Этот процесс шел очень активно, но технологическая податливость дерева и его архитектурно-художественная специфика вели к своеобразной интерпретации стилевых тенденций и направлений тех лет, что способствовало формированию их региональных вариантов, складывающихся в своей совокупности в некий местный “томский стиль”...» [3, с. 96–97].

В фондах Музея деревянного зодчества в Томске хранятся два наличника – один на одинарное, а второй на парное сдвоенное окно с несохранившегося дома по ул. Лермонтова, 41 (ул. Малая Болотная). Исследования показали, что 27 августа 1903 г. в Строительное управление обратился прапорщик Григорьев с ходатайством о разрешении ему ремонта и переустройства своего дома, расположенного на данной улице. Ремонт поручили младшему инженеру строительного управления А.Д. Крячкову

(рис. 5), о чем свидетельствуют резолюция на прошении и подпись инженера. Есть все основания считать, что наличники с несохранившегося дома, выполненные в стиле модерн, проектировал А.Д. Крячков (рис. 6). Эксперименты молодого архитектора говорят о тех «иррациональных» формах модерна, на которые В.С. Горюнов и М.П. Тубли указывают в книге «Архитектура эпохи модерна» в связи с творчеством таких представителей западноевропейского «нового стиля», как Х. ван де Вельде, Г. Гимар, В. Орта и А. Эндель [5, с. 158–173]. Рисунки, в котором выполнен наличник, говорит о том, что это не образец «народного» искусства, а изделие профессионала, который не только знаком с архитектурными формами, но и с современными течениями в архитектуре.

Об особняке гражданского инженера А.Д. Крячкова в г. Томске (ул. Кирова, 7) написано достаточно много. Двухэтажный деревянный дом-особняк с полуподвалом и мансардой был спроектирован и построен архитектором в 1909–1910 гг. Авторский проект был задуман как образец для массовой застройки городов Сибири деревянными домами (рис. 7).

В 1902 г. А.Д. Крячков закончил Институт гражданских инженеров в Санкт-Петербурге, а в 1907 г. вместе с художником-архитектором В.Ф. Оржешко перенимал опыт строительства в городах Германии, Франции и Италии.

В 1909 г. гражданским инженером А.Д. Крячковым был представлен в Томскую городскую думу план на постройку собственного особняка на ул. Бульварной (ныне – проспект Кирова, 7). На «Генеральном плане усадебного места» А.Д. Крячкова по ул. Бульварной стоит подпись городского архитектора Т.Л. Фишеля о согласовании. Губернский строительный комитет направил этот проект на утверждение в Петербург. Экспериментальный деревянный дом А.Д. Крячкова с его автономной системой жизнеобеспечения первоначально не был утвержден. Дело в том, что два его этажа с полуподвалом и жилым мезонином в сумме составили почти три этажа, что было запрещено строительным уставом для деревянных домов. А.Д. Крячков считал, что богатые лесные запасы Сибири должны быть максимально использованы в строительстве. Поэтому российские архитекторы должны искать наиболее рациональные варианты



Рис. 5. Профессор Томского технологического института, гражданский инженер А.Д. Крячков (1876–1950). Фотография 1913 г. Источник: музей ТПУ, www.lib/tpu.ru/event

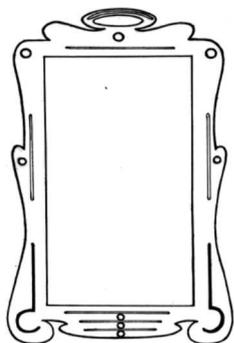


Рис. 6. Графическое изображение наличника дома, существовавшего на ул. Лермонтова (Малая Болотная). Гражданский инженер А.Д. Крячков. 1903 г.



Рис. 7. Томск. Дом-особняк А.Д. Крячкова на пр-те Кирова, 7 (ул. Бульварная). 1909–1910 гг. Фото автора, 2014 г.
а – главный фасад; б–в – фрагменты главного фасада

жилых деревянных зданий. Своим проектом он хотел доказать, что деревянные дома такого типа, снабженные центральным отоплением, которое в то время считалось неприемлемым для деревянных построек, нужны и достаточно экономичны [3]. Однако в дальнейшем этот тип жилого дома так и не получил большого распространения. Стремление архитектора к усовершенствованию функциональных качеств деревянных домов не было поддержано.

Особняк А.Д. Крячкова отличается богатством геометрической пластики всех четырех фасадов. Свободное построение мансардного этажа и объемов крыши подчинено главной оси. Ось проходит по центру главного фасада, включающего мансардное окно, эркер и центральное окно первого этажа. Диагональное построение парных окон центрального входа и балкона уравнивает композиционное построение фасада. Архитектор активно использовал декор, характерный для модерна. Отказавшись от подзоров, он объединил фризовую часть с надоконными досками наличников второго этажа.

Завершая обзор, необходимо еще раз отметить, что деревянная архитектура Томска богата не только народными традициями. Она отличается

от других городов Сибири многообразием стилей, которые архитекторы и гражданские инженеры широко использовали как в каменном, так и в деревянном строительстве. В статье говорится об общих тенденциях в развитии стиля модерн и о его приверженности к деревянной архитектуре одного города, который на данный момент сохранил наибольшее количество памятников деревянного зодчества. Не рассмотренными остались такие архитектурные направления конца XIX – начала XX в., как «северный модерн» и «рационализм». Деревянная архитектура этих стилей и направлений существует в сибирских городах и требует специального рассмотрения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гидион З. Пространство, время, архитектура. М.: Стройиздат, 1984. 455 с.
2. Тасалов В.И. Прометей или орфей. М.: Искусство, 1967. 372 с.
3. Залесов В.Г. Сибирский период деятельности архитектора П.Ф. Федоровского // Вестник ТГАСУ. 2007. № 1. С. 35–40.
4. Герасимов А.П. Томский модерн. Томск: В-спектр, 2010. С. 82.
5. Горюнов В.С., Тубли М.П. Архитектура эпохи модерна. Концепции. Направления. Мастера. СПб.: Стройиздат, 1994. 360 с.
6. Кириченко Е.И. Русский стиль. Поиски выражения национальной самобытности. Народность и национальность. Традиции древнерусского и народного искусства в русском искусстве XVIII – нач. XX века. М.: Галарт; АСТ, 1998. 430 с.

Герасимов Александр Петрович, канд. искусствоведения, доц.;

E-mail: gap11@sibmail.com

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 21.04.17

Gerasimov Aleksandr Petrovich, PhD, Ass. Professor; E-mail: gap11@sibmail.com
Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

WESTERN EUROPEAN MODERN AND NEO-ROMANTIC TRENDS IN THE WOODEN ARCHITECTURE OF SIBERIAN CITIES

This article is devoted to art Nouveau in wooden architecture of Western Siberia in the early twentieth century. In the largest cities of Western Siberia of that period, was successfully tested the “new” building materials – natural stone, brick, concrete. However, traditional “live” tree is still in great demand both in residential and in public cult buildings. The article examines the distinctive features of Western European art Nouveau style and its interpretation in wooden living persons-nacah of the city of Tomsk. Noted the commitment of the Tomsk architects and civil engineers to follow the “advanced” requirements of the time. The results of their creative searches, in particular, was embodied in the architecture of their personal mansions, designed in the “new style”. This aspect in the wooden architecture of Western Siberia is insufficiently studied and requires further research.

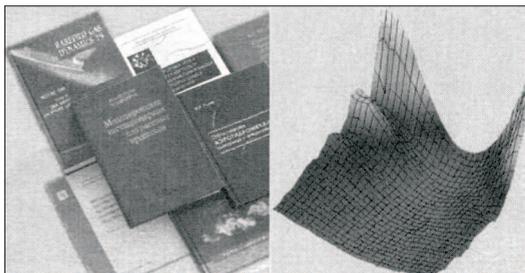
Key words: styles and directions in architecture, wooden architecture of Siberia, modern.

REFERENCES

1. Gidion Z. Prostranstvo, vremya, arkhitektura [Space, time, architecture]. Moscow, Stroyizdat, 1984. 455 p. (in Russian)
2. Tasalov V.I. Prometey ili orfey [Prometheus or orpheus]. Moscow, 1967. 372 p. (in Russian)
3. Zalesov V.G. Sibirskiy period deyatel'nosti arkhitekтора P.F. Fedorovskogo [Siberian period of the activities of the architect P.F. Fedorovsky]. Vestnik TGASU [Herald TSUAB]. 2007. No. 1. Pp. 35–40. (in Russian)
4. Gerasimov A.P. Tomskiy modern [Tomsk Art Nouveau]. Tomsk, 2010. P. 82. (in Russian)
5. Goryunov V.S., Tubli M.P. Arkhitektura ehpokhi moderna. Kontseptsii. Napravleniya. Mاستera [Architecture of the Art Nouveau. Concepts. Directions. Masters]. Saint-Petersburg, 1994. 360 p. (in Russian)
6. Kirichenko E.I. Russkiy stil'. Poiski vyrazheniya natsional'noy samobytnosti. Narodnost' i natsional'nost'. Traditsii drevnerusskogo i narodnogo iskusstva v russkom iskusstve XVIII – nach. XX veka [Russian style. The search for the expression of national identity. Idigenous people and nationality. Traditions of Old Russian and folk art in the Russian art of the XVIII – early. XX century]. Moscow, 1998. 430 p. (in Russian)



НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



УДК 691.11 : 674.032 : 536.21

Р.А. НАЗИРОВ, П.В. ЛЯМЗИНА

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СИБИРСКОЙ СОСНЫ

Представлены результаты экспериментальных исследований теплофизических характеристик сибирской сосны при различных температурах и влагосодержании. Полученные результаты сравниваются с литературными данными. Приведена зависимость между термическими свойствами древесины (коэффициентами тепло- и температуропроводности) и содержанием влаги в ней. Экспериментально подтверждено, что теплопроводность древесины увеличивается с увеличением влагосодержания и температуры. По полученным данным составлено уравнение зависимости коэффициента теплопроводности от температуры и влажности. Экспериментальные данные имеют научное значение и практическое применение при численном моделировании тепловой защиты зданий.

Ключевые слова: коэффициент теплопроводности, коэффициент температуропроводности, температура воздуха, влагосодержание, древесина, сибирская сосна.

Введение. Теплофизические характеристики древесины напрямую зависят от температурно-влажностного режима эксплуатации. Строительство из деревянных конструкций достаточно распространено на северных территориях с суровыми климатическими условиями. Наиболее популярным типом древесины для строительства на территории Красноярского края является сосна. В СП 50.13330.2011 представлены расчетные показатели коэффициента теплопроводности в сухом состоянии и в условиях эксплуатации А и Б (что согласно СП 23-101–2004 соответствует 80 и 97%-й относительной влажности воздуха) (табл. 1).

Целью эксперимента являлось установление зависимости коэффициентов тепло- и температуропроводности от температуры и влажности образцов сибирской сосны.

Изучение теплофизических характеристик древесины достаточно актуально. Так, в книге А.У. Франчука [1] приведен коэффициент теплопроводности дерева различной плотности при положительных и отрицательных температурах и разных значениях объемной влажности. В статьях [2–5] пред-

Таблица 1. Расчетные теплотехнические показатели сосны

Материал	Теплопроводность λ , Вт/м · °С, в сухом состоянии	Теплопроводность λ , Вт/м · °С, при условиях эксплуатации	
		А	Б
Сосна поперек волокон $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$	0,09	0,14	0,18
Сосна вдоль волокон $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$	0,18	0,29	0,35

ставлены экспериментальные данные коэффициента теплопроводности древесины хвойных (лиственница, пихта, сосна, ель) и лиственных пород (липа, лауан, бук, береза, ясень, дуб, акация, тополь) при положительных температурах, а также уравнения и графики зависимости коэффициента теплопроводности от влажности образцов. Большое внимание уделяется математическому описанию коэффициента теплопроводности мерзлой древесины [6].

Помимо коэффициента теплопроводности процесс переноса тепла в древесине характеризуется коэффициентом температуропроводности. Так, в работе [7] представлена зависимость коэффициента температуропроводности древесины от влажности при положительных температурах, а в [8–9] – математическое описание зависимости температуропроводности мерзлой древесины.

Теплофизические характеристики древесины зависят не только от породы, но и от вида и места произрастания, свойства сибирской сосны нельзя назвать изученными в достаточной мере.

Материалы и методы. В ходе эксперимента были использованы образцы сибирской сосны I сорта, размером $100 \times 100 \times 100 \text{ мм}$ и плотностью $398 \pm 5 \text{ кг/м}^3$ (в сухом состоянии). Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности было проведено при стационарном тепловом режиме. Для эксперимента при положительных температурах был использован измеритель теплопроводности TLP-500H (рис. 1).



Рис. 1. Порядок проведения эксперимента с использованием TLP-500H

Принцип действия прибора основан на создании проходящего через исследуемый образец стационарного теплового потока. По величине теплового потока, температурного перепада между гранями образца и его толщине вычисляется теплопроводность образца λ

$$\lambda = \frac{\delta q}{\Delta T}, \quad (1)$$

где δ – толщина образца;

q – плотность теплового потока, проходящего через образец;

ΔT – разность температур между противоположными гранями образца.

Влажность деревянных образцов определена по ГОСТ 16483.7–71.

На начальном этапе изучены образцы в сухом состоянии (предварительно высушенные в сушильном шкафу), а затем – при влагосодержании 15 % по массе (что эквивалентно 77 % относительной влажности воздуха [10]).

Для проведения эксперимента при отрицательных температурах было смонтировано оборудование, работающее также по принципу действия теплового потока. В климатический шкаф был помещен образец в теплозащитном кожухе и с нагревательным элементом с нижней стороны (рис. 2).

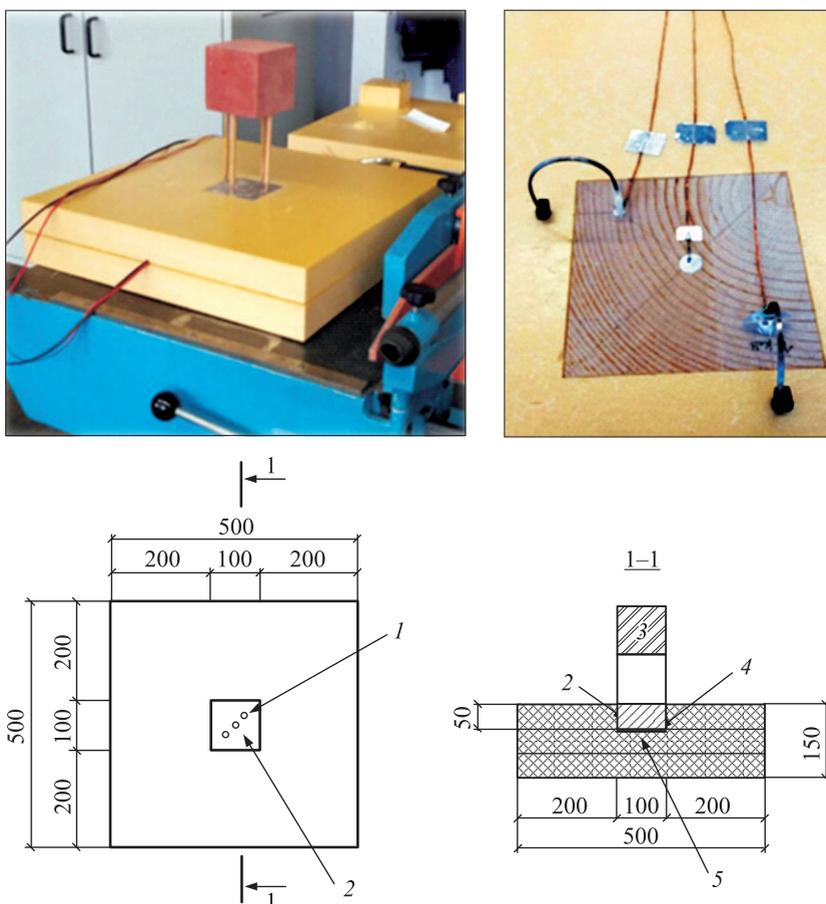


Рис. 2. Оборудование для измерений при отрицательных температурах
 1 – датчики; 2 – образец; 3 – груз; 4 – алюминиевая плита $t = 5$ мм; 5 – нагревательный элемент

Температурный поток создается за счет установки постоянной температуры в климатическом шкафу, обеспечиваемой нагревательным элементом.

Результаты и обсуждение. На рис. 3 представлена зависимость коэффициента теплопроводности сосны вдоль волокон от температуры и влагосодержания. Согласно полученным данным, зависимость коэффициента

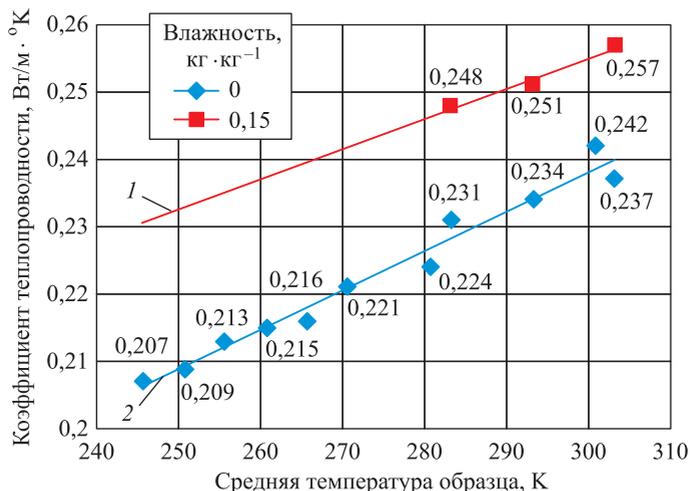


Рис. 3. График изменения коэффициента теплопроводности сосны вдоль волокон от температуры при различной влажности

$$1 - \lambda = 0,00045T + 0,12008, R^2 = 0,96429; 2 - \lambda = 0,00059T + 0,06253, R^2 = 0,97046$$

теплопроводности древесины от температуры воздуха для различной влажности носит прямолинейный характер. При этом значения углового коэффициента зависимости коэффициента теплопроводности от температуры для сухих образцов меньше, чем для влажных. Влажный образец древесины представляет собой систему, состоящую из воды (льда при отрицательных температурах), воздуха и древесного материала. Теплопроводность каждого из этих компонентов различна. Поэтому замена воздуха в порах древесины водой вызывает увеличение ее теплопроводности. Так, повышение температуры сухого образца на 10 К увеличивает его коэффициент теплопроводности на 2,57 %, а с влагосодержанием 15 % – лишь на 1,82 %.

По экспериментальным данным при положительных температурах получено уравнение (2) зависимости коэффициента теплопроводности от двух параметров – влажности и температуры воздуха (рис. 4). При этом коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0,9399$.

$$\lambda(w, T) = -0,6635 - 0,789w + 0,0057T + 0,17w^2 - 0,91 \cdot 10^{-5}T^2 + 0,002973wT. \tag{2}$$

Значения коэффициентов зависимости указывают на то, что влажность образцов оказывает большее влияние на коэффициент теплопроводности, чем их температура [11].

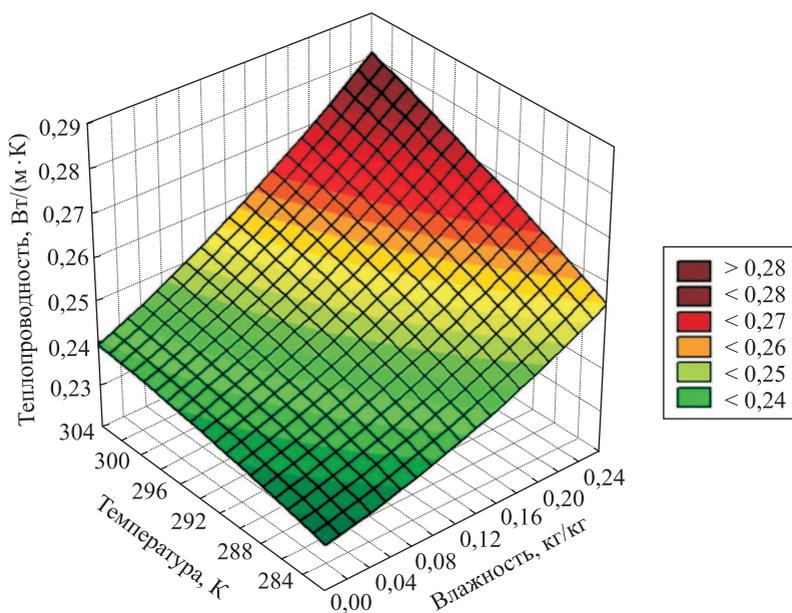


Рис. 4. График зависимости коэффициента теплопроводности сосны вдоль волокон от температуры и влажности

В табл. 2 представлены экспериментальные данные коэффициента теплопроводности образцов, рассчитанные по уравнению (2), а также значения абсолютной и относительной погрешностей. Максимальное значение относительной погрешности составляет 3,66 %, что не более 5%-й погрешности прибора.

Таблица 2. Сравнительная оценка экспериментальных и расчетных значений

Экспериментальные данные	Расчетные значения по уравнению	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность, %
0,231000	0,229373	0,001627	0,704437
0,228000	0,236345	-0,008345	-3,65989
0,248000	0,241105	0,006895	2,780066
0,253000	0,253177	-0,000177	-0,07005
0,234000	0,234156	-0,000156	-0,06685
0,246000	0,244101	0,001899	0,771829
0,251000	0,250349	0,000651	0,259467
0,263000	0,265394	-0,002394	-0,91012
0,237000	0,237115	-0,000115	-0,04855
0,249700	0,250033	-0,000333	-0,13336
0,257000	0,257767	-0,000767	-0,29843
0,277000	0,275785	0,001215	0,438654
			Σ -0,2328

Не менее важным теплофизическим свойством материала является коэффициент температуропроводности. Он был рассчитан по формуле

$$a = \frac{\lambda}{\rho c}, \quad (3)$$

где c – удельная теплоемкость ($c_{\text{сух}} = 2300 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $c_{15\%} = 2547 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$);
 ρ – плотность материала ($\rho_{\text{сух}} = 398 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\rho_{15\%} = 458 \text{ кг}/\text{м}^3$);
 λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

На рис. 5 представлен график зависимости коэффициента температуропроводности сосны вдоль волокон от температуры и влагосодержания.

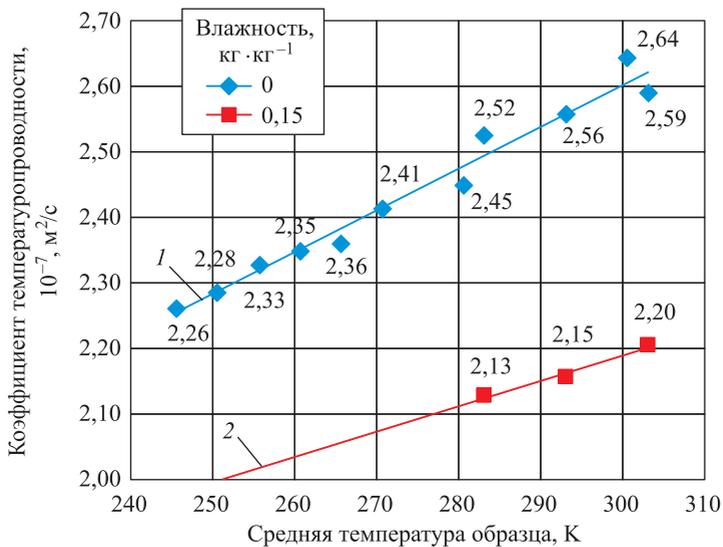


Рис. 5. График изменения коэффициента температуропроводности сосны вдоль волокон в зависимости от температуры и влажности

$$1 - a = 0,0064T + 0,6831, R^2 = 0,9705; 2 - a = 0,0039T + 1,0303, R^2 = 0,9643$$

Полученные экспериментальные данные коэффициента теплопроводности сухих образцов имеют значения больше нормативного на 30 %, влажных образцов – на 15,5 % меньше представленного в СП 50.13330.2011, что указывает на возможность уточнения расчетов тепловой защиты деревянных конструкций и экономии строительных материалов при возведении зданий.

В настоящее время идет подготовка оборудования к проведению экспериментов по определению коэффициента теплопроводности сибирской сосны поперек волокон при различной влажности и низких отрицательных температурах, характерных для районов Крайнего Севера Красноярского края.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Франчук А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов. М.: НИИ строит. физики, 1969. 142 с.

2. Yu Z.-T., Xu X., Fan L.-W., Hu Y.-C. and Cen K.-F. Experimental measurements of thermal conductivity of wood species in China: effects of density, temperature, and moisture content // *Forest Products Journal*. 2011. Vol. 61, No. 2. P. 130–135.
3. Dupleix A., Kusiak A., Hugues M., Rossi F. Measuring the thermal properties of green wood by the transient plane source (TPS) technique // *Holzforschung*, De Gruyter. 2012. Vol. 67 (4). P. 437–445.
4. Hamiyet Sxahin Kol. The transverse thermal conductivity coefficients of some hardwood species grown in Turkey // *Forest Products Journal*. 2009. Vol. 59(10). P. 58–63.
5. Suleiman B.M., Larfeldt J., Leckner B., Gustavsson M.K. Thermal conductivity and diffusivity of wood // *Wood Science and Technology*. 1999. Vol. 33(6). P. 465–473.
6. Делийски Н., Соколовски С., Дзуренда Л. Вычисление коэффициента теплопроводности древесины в надгигроскопическом диапазоне во время ее оттаивания // *Trieskové abeztrieskové obrábaniedreva*. 2012. Vol. 8(1). P. 415–420.
7. Шепель Г.А., Надеин В.Ф., Баланцева Н.Б. О коэффициенте температуропроводности древесины // *Изв. вузов. Лесной журн*. 2007. № 2. С. 133–135.
8. Делийски Н., Дзуренда Л., Соколовски С. Компьютерное вычисление коэффициента температуропроводности мерзлой древесины // *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Forestry and Wood Technology*. 2010. Vol. 71. P. 101–105.
9. Deliiski N., Tumbarkova N., Stanev R., Dzurenada L. Computation of the wood temperature conductivity above the hygroscopic range during wood freezing // *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Forestry and Wood Technology*. 2015. Vol. 91. P. 40–45.
10. Forest Products Laboratory. 2010. Wood handbook—Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S.
11. Чудинов Б.С. Теория тепловой обработки. М., 1968. 255 с.

Назирова Рашит Анварович, д-р техн. наук, проф.
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск
Лямзина Полина Витальевна, асп.
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Получено 14.04.17

Nazirov Rashit Anvarovich, DSc, Professor
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
Lyamzina Polina Vitalyevna, Post-graduate Student
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT OF SIBERIAN PINE

The paper presents the results of thermophysical characteristics of Siberian pine at positive and negative temperatures and different levels of moisture content. The results are compared with literature data. A relationship was found between the thermal properties coefficients of thermal conductivity and thermal diffusivity and moisture contents. Experimentally confirmed that the thermal conductivity of wood increases with increasing moisture content and temperature. According to the obtained data the equation of

dependence of coefficient of thermal conductivity on temperature and humidity is worked out. The obtained experimental data have scientific value and practical application in numerical modeling of buildings' thermal protection.

Key words: coefficient of thermal conductivity, coefficient of thermal diffusivity, air temperature, moisture content, wood, siberian pine.

REFERENCES

1. Franchuk A.U. Tablitsy teplotekhnicheskikh pokazateley stroitel'nykh materialov [Table of thermal properties of building materials]. Moscow, 1969. 142 p. (in Russian)
2. Yu Z.-T., Xu X., Fan L.-W., Hu Y.-C. and Cen K.-F. Experimental measurements of thermal conductivity of wood species in China: effects of density, temperature, and moisture content. *Forest Products Journal*, 2011. Vol. 61, No. 2. Pp. 130–135.
3. Dupleix A., Kusiak A., Hugues M., Rossi F. Measuring the thermal properties of green wood by the transient plane source (TPS) technique. *Holzforschung De Gruyter*. 2012. Vol. 67 (4). Pp. 437–445.
4. Hamiyet Sxahin Kol. The transverse thermal conductivity coefficients of some hardwood species grown in Turkey. *Forest Products Journal*. 2009. Vol. 59(10). Pp. 58–63.
5. Suleiman B.M., Larfeldt J., Leckner B., Gustavsson M.K. Thermal conductivity and diffusivity of wood. *Wood Science and Technology*. 1999. Vol. 33(6). Pp. 465–473.
6. Deliski N., Sokolovski S., Dzurinda L. The calculation of the coefficient of thermal conductivity of wood in nonhygroscopic range during its thawing. *Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva*. 2012. Vol. 8(1). Pp. 415–420.
7. Shepel' G.A., Nadein V.F., Balantseva N.B. O koeffitsiente temperaturoprovodnosti drevesiny [About the thermal diffusivity of wood]. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal* [Bulletin of Higher Educational Institutions. Forestry journal]. 2007. Vol. 2. Pp. 133–135. (in Russian)
8. Deliski N., Dzurenda L., Sokolovski S. Komp'yuternoe vychislenie koeffitsienta temperaturoprovodnosti merzloy drevesiny [Computer calculation of thermal diffusivity of frozen wood]. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Forestry and Wood Technology*. 2010. Vol. 71. Pp. 101–105.
9. Deliski N., Tumbarkova N., Stanev R., Dzurenda L. Computation of the wood temperature conductivity above the hygroscopic range of wood during freezing. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Forestry and Wood Technology*. 2015. Vol. 91. Pp. 40–45.
10. Forest Products Laboratory. 2010. Wood handbook—Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S.
11. Chudinov B.S. Teoriya teplovoy obrabotki [Theory of Thermal Treatment of Wood]. Moscow, 1968. 255 p. (in Russian)

БЛАГОДАРНОСТЬ. Проведение данной научно-исследовательской работы было выполнено во время научной стажировки в Бранденбургском технологическом университете Котбус-Зенфтенберг в рамках международного научно-образовательного сотрудничества (шифр 11.740.2016/ДААД).

ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ ИЗ ПОДЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Специалистами Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин) разработана технология подготовки питьевой воды из подземных источников с повышенным содержанием железа, марганца, солей жесткости, фенолов, сероводорода.

Технологическая схема предусматривает

- обработку исходной воды в дегазаторе-окислителе новой конструкции;
- умягчение и осветление воды в разработанной конструкции реактора-осветлителя с предварительной обработкой реагентами;
- фильтрацию через дробленые горелые породы при значительном содержании органических примесей;
- доочистку на сорбционных фильтрах.



Для подземных вод с нормативной жесткостью из предлагаемой технологической схемы может быть исключена ступень обработки в реакторе-осветлителе.

Для сооружений производительностью более 25 000 м³/сут предусматриваются радиальные фильтры.

Замкнутая система использования промывной воды с обработкой реагентом «Кемфлок» делает предложенную схему бессточной, а утилизация осадков по разработанной эффективной технологии позволяет отнести ее к категории безотходных.

Технология внедрена в населенных пунктах Кемеровской и Новосибирской областей.

Высокое качество питьевой воды и минимальные затраты при очистке подземных вод по разработанной технологии позво-

лят решить социальную проблему питьевого водоснабжения населенных пунктов и в других регионах.

На новую технологию получен патент № 2328454, Россия.

Разработчики:

Сколубович Юрий Леонидович, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. РААСН;

Войтов Евгений Леонидович, д-р техн. наук, доц.

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

E-mail: patent@sibstrin.ru

Internet: www.sibstrin.ru/innovation

Тел. +7(383) 266 42 81

Вниманию авторов: для оформления научных статей по требованиям ВАК, РИНЦ, Scopus на сайте нашего журнала <http://izvuzstr.sibstrin.ru> помещены «ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ, ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И РЕДАКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ РУКОПИСЕЙ СТАТЕЙ». Просим вас обратить особое внимание на составление библиографического списка на английском языке – REFERENCES:

- для ссылок на зарубежные источники 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; название статьи; затем в квадратных скобках – название статьи в переводе на английский язык; остальные элементы библиографического описания на английском языке, с исключением разделителей, таких как /, – , //, и заменой №, с. и С. соответственно на No., p. и Pp., в конце – (in Russian).

Примеры оформления текста статей и REFERENCES в нашем журнале можно найти на сайте в рубрике «полнотекстовые версии статей».

Журнал публикует информацию о научно-технических разработках в области строительства объемом 1 с., включая 1–2 иллюстрации. Указываются разработчики: фамилия, имя, отчество полностью; звания; контактная информация и место работы. Электронная версия обязательна.

Редакция имеет право на редакционную обработку статьи, для снятия возникших у редактора вопросов просим присылать номер сотового телефона одного из авторов (не для опубликования).

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

«СТРОИТЕЛЬСТВО»

Журнал имеет разделы

Строительные конструкции	Строительство автомобильных дорог и мостов
Теория инженерных сооружений	Научные проблемы архитектуры и экологии
Строительные материалы и изделия	Научно-методический раздел
Экономика и организация строительства	В лабораториях вузов
Автоматизация и технология строительного производства	Внедрение научных достижений в производство
Гидротехническое строительство	Научная информация
Санитарная техника	

На 1-е полугодие по каталогу «Роспечать» 2017 г.

каталожная цена за 6 месяцев — 3900 р.

цена отдельного номера — 650 р.

ББК 38
И 33
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО**

№ 5 (701) 2017

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*

Технический редактор *Н.М. Макаренко*

Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*

Корректор *Г.И. Шведкина*

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 29.05.17. Формат 70×108 ¹/₁₆
Усл. печ. л. 9,63+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 5100

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