

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РФ

МЕЖДУНАРОДНАЯ ОБЩЕСТВЕННАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ СОДЕЙСТВИЯ РАЗВИТИЮ
СТРОИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

СТРОИТЕЛЬСТВО

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

№ 11–12 (707–708)

Ноябрь–декабрь 2017 г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- В.Н. Азаров, д-р техн. наук, проф., 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 Штутгарт, Германия
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., 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. Нуужинов, д-р техн. наук, проф., Казахстанский МИРР, Караганда, Казахстан
Ю.П. Панибратов, акад. РААСН, д-р экон. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург
Г.И. Пустоветов, чл.-кор. РААСН, д-р архитектуры, проф., НГУАДИ, Новосибирск
В.Г. Себешев, поч. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф. (главный редактор), НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
Ю.Л. Сколубович, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
Ю.А. Феофанов, д-р техн. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург
Й.В. Ху, PhD, проф., Национальный университет г. Инчхон, Республика Корея
Е.М. Чернышов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ВГТУ, Воронеж
Е.Ч. Шин, PhD, проф., Национальный университет г. Инчхон, Республика Корея

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:

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

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ

Краснощеков Ю.В. Несущая способность по наклонным сечениям железобетонных элементов при совместном действии поперечных сил и моментов	5
---	---

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Овчаренко Г.И. Высокоморозостойкий шлакосодержащий цементный бетон	15
Мирюк О.А. О формировании высокопористой структуры магнезиальных композиционных материалов	22
Игнатова О.А., Макарова Н.В. Влияние ультрадисперской добавки сажевого пигмента на свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего	31
Пичугин А.П., Батин М.О., Кудряшов А.Ю., Никитенко К.А. Эксплуатационные свойства древесины, модифицированной полимерными композициями с нанодобавками	42
Сарантая Ж., Дашибамц Д., Себелев И.М. Изменение прочности на сжатие элементов деревянных конструкций, эксплуатируемых в условиях Монголии	51

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ, ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКОЛОГИИ

Смолина О.О. Способы повышения экоустойчивости урбанизированных территорий	62
---	----

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Канушин В.Ф., Ганагина И.Г., Косарев Н.С., Голдобин Д.Н. К вопросу о необходимости учета неприливных изменений силы тяжести при деформационном мониторинге гидротехнических сооружений	72
Макеев С.А., Краснощеков Ю.В., Соколовский З.Н. Инженерная методика анализа пространственного деформирования упругих прямых стержней с учетом геометрической нелинейности	81

ДОСТИЖЕНИЯ НАУКИ – ПРОИЗВОДСТВУ

Саргсян А.Е., Гукова Е.Г. Обоснование сейсмостойкости строительных конструкций здания резервной дизельной электростанции	92
---	----

УКАЗАТЕЛЬ статей, опубликованных в 2017 г. (№ 1–12)	104
--	-----

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE
OF RUSSIAN FEDERATION

INTERNATIONAL PUBLIC ORGANIZATION
“ASSOCIATION OF EDUCATIONAL
CIVIL ENGINEERING INSTITUTIONS”

NEWS OF HIGHER EDUCATIONAL
INSTITUTIONS

CONSTRUCTION

Scientific-theoretical journal
Published since March 1958
Monthly

No. 11–12 (707–708)
November–December 2017

EDITORIAL BOARD

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

Responsible secretary N.V. Bitkina

The editorial office's address:

113 Leningradskaya St., Novosibirsk, Russian Federation, 630008
Phone number +7 (383) 266 28 59
www.izvuzstr.sibstrin.ru
E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

CONTENTS

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND STRUCTURES. BASES AND FOUNDATIONS	
Krasnoshchekov Yu.V. The bearing capacity for inclined sections reinforced concrete elements under joint the impact of transverse forces and moments	5
BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS	
Ovcharenko G.I. High frost-resistant slag-containing cement concrete	15
Miryuk O.A. On the formation of the highly porous structure of magnesium composite materials	22
Ignatova O.A., Makarova N.V. Influence of ultradispersed additive carbon pigment on the properties of gypsum-cement-pozzolan binding	31
Pichugin A.P., Batin M.O., Kudryashov A.Yu., Nikitenko K.A. Performance properties of wood the modified polymer compositions with nano-additives	42
Sarantuya J., Dashjamts D., Sebelev I.M. Investigation changes of strength on compression of elements of wooden constructions exploited in Mongolia conditions	51
SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE, TOWN PLANNING AND ECOLOGY	
Smolina O.O. Ways to improve the sustainability of urban territories	62
SECTION OF SCIENTIFIC METHODOLOGY	
Kanushin V.F., Ganagina I.G., Kosarev N.S., Goldobin D.N. To the need accounting tidal gravity change during deformation monitoring of hydraulic structures	72
Makeev S.A., Krasnoshchekov Yu.V., Sokolovskiy Z.N. Engineering methods of the analysis of the spatial deformation of elastic straight rods with account for the geometric nonlinearity	81
REDUCTION OF ADVANCES IN SCIENCE TO PRACTICE	
Sargsyan A.E., Gukova E.G. Substantiation of seismic safety of the standby diesel power plant	92
LIST of articles in 2017 (No. 1–12)	104

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ



УДК 624.072.21.012.4.046

Ю.В. КРАСНОЩЕКОВ

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ПО НАКЛОННЫМ СЕЧЕНИЯМ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ И МОМЕНТОВ

Предлагается обобщенная расчетная модель несущей способности железобетонных элементов по наклонным сечениям, учитывающая совместное действие поперечных сил и изгибающих моментов. В основе модели заложена предпосылка о сложном напряженном состоянии нормального сечения, проходящего через вершину наклонной трещины, под действием сдвигающих и изгибающих усилий. Предлагаемую модель можно применять для определения длины проекции наклонного сечения. Адекватность модели подтверждена сравнением результатов расчета и выполненных ранее испытаний балок. Сделан вывод, что одним из основных регуляторов надежности железобетонных элементов, рассчитанных по обобщенной модели, является расчетное значение сопротивления сдвига сжатого бетона.

Ключевые слова: прочность железобетона, наклонное сечение, поперечная сила, момент, обобщенная расчетная модель, сопротивление бетона сдвигу.

Введение. Расчет прочности изгибаемых элементов по наклонным сечениям изначально ведется раздельно на действие поперечных сил Q и изгибающих моментов M , хотя известно, что разрушение по наклонным сечениям является следствием совместного действия этих усилий. Еще в 1978 г. задача влияния моментов на несущую способность по наклонным сечениям, оцениваемую предельной поперечной силой, рассматривалась как первостепенная, требующая скорейшего разрешения на основе совместного учета уравнений равновесия поперечных сил и моментов в наклонном сечении [1]. Тем не менее, авторы последней редакции норм проектирования железобетонных конструкций были вынуждены признать, что, несмотря на многочисленные исследования в этой области, предлагаемые методы расчета прочности железобетонных элементов при действии поперечных сил еще не достигли такого уровня, чтобы могли быть приняты в качестве нормативных [2]. Очевидно поэтому в действующих нормах проектирования железобетонных конструкций (СНиП 52-01-2003 и СП 63.13330.2012),

в отличие от СНиП 2.03.01–84*, принятые разные расчетные схемы для Q и M , что подчеркивает ориентацию составителей норм на раздельный учет усилий при расчете прочности наклонных сечений и затрудняет переход к обобщенному расчету. По нашему мнению, исследования по совершенствованию нормативного метода расчета несущей способности по наклонным сечениям сверхактуальны, учитывая активизацию по внедрению далеко не идеальных европейских норм проектирования железобетонных конструкций.

Вероятно, последней попыткой решения «проклятого вопроса железобетона» явились «Краткие заметки о расчете железобетонных конструкций на действие поперечных сил», разработанные НИИЖБ в 2008 г. Авторы «Кратких заметок» рассматривали, в частности, зависимость между относительными значениями поперечных и продольных сил в бетоне над наклонной трещиной в виде

$$Q/Q_{ult} + N/N_{ult} = 1. \quad (1)$$

Отмечалось, что предложенная зависимость является наиболее простым выражением для предельных усилий в бетоне над наклонной трещиной, но требующим анализа экспериментальных данных.

Зависимость, подобная (1), предлагалась также в работе [3] в качестве обобщенного условия прочности наклонных сечений, учитывающего совместное действие поперечных сил и изгибающих моментов.

В данной статье приведены обоснование обобщенной модели, результаты расчета на ее основе ранее выполненных экспериментальных балок, а также изложены соображения о возможности практического применения и совершенствования новой модели.

Нормативные требования и расчетная схема. С целью определения основных расчетных параметров рассмотрим особенности современного расчета прочности по наклонным сечениям на основе метода предельных состояний, принятого в отечественных нормах проектирования.

Прочность наклонных сечений рассчитывают из условий, по которым расчетные усилия Q и M от внешних нагрузок, действующих в наклонном сечении с длиной горизонтальной проекции c , должны быть меньше или равны внутренним предельным расчетным усилиям Q_{ult} и M_{ult} в этом сечении, т.е.:

$$Q \leq Q_{ult} \text{ или } Q/Q_{ult} \leq 1; \quad (2)$$

$$M \leq M_{ult} \text{ или } M/M_{ult} \leq 1. \quad (3)$$

Составляющие предельного значения $Q_{ult} = Q_b + Q_{sw}$: поперечная сила Q_b , воспринимаемая бетоном в наклонном сечении шириной b и рабочей высотой h_0 , которая в настоящее время определяется по эмпирической формуле в зависимости от расчетного сопротивления бетона растяжению R_{bt}

$$Q_b = 1.5R_{bt}bh_0^2/c, \quad (4)$$

и поперечная сила Q_{sw} , воспринимаемая поперечной арматурой в наклонном сечении, которая устанавливается в зависимости от интенсивности усилий в этой арматуре при площади сечения A_{sw} , расчетном сопротивлении R_{sw} и шаге поперечной арматуры s_w

$$Q_{sw} = 0,75cR_{sw}A_{sw}/s_w. \quad (5)$$

В условиях (3) рассматриваются моменты M всех сил относительно точки приложения усилия N_s растянутой арматуры или равнодействующей усилий в сжатой зоне N_b . Составляющие предельного значения $M_{ult} = M_s + M_{sw}$: момент, воспринимаемый продольной растянутой усилием арматурой, пересекающей наклонное сечение, и определяемый по формуле

$$M_s = N_s z, \quad (6)$$

и момент M_{sw} , воспринимаемый поперечной арматурой в наклонном сечении, который вычисляется по формуле

$$M_{sw} = 0,5Q_{sw}c. \quad (7)$$

Плечо пары сил N_s и N_b , определяющих момент M_s , допускается принимать приближенно $z = 0,9h_0$.

Влияние моментов при расчете на поперечную силу по условиям (2) напрямую не учитывается. Однако не исключено, что оно учитывается косвенно составляющими предельного значения Q_{ult} .

Обобщенная функция прочности при поперечном изгибе. Рассмотрим равновесное состояние блока железобетонного изгибаемого элемента, отсеченного справа комплексным сечением, состоящим из наклонной трещины с длиной проекции c и высотой $(h_0 - x)$ и сжатой зоны x нормального сечения, проходящего через вершину трещин (рис. 1). Разрушение по комплексному сечению подтверждается многочисленными экспериментами.

На блок действуют поперечные силы Q_b и Q_{sw} , уравновешенные силой Q , уравновешенные между собой продольные силы N_s и N_b и изгибающие моменты, образуемые этими силами. Принимаем для упрощения $M_0 = 0$ и исключаем влияние внешних нагрузок, расположенных в пределах проекции наклонного сечения.

Функцию прочности (надежности) железобетонного элемента при поперечном изгибе примем в обобщенном виде

$$Q_b/Q_{ult} + M_b/M_{ult} = 1. \quad (8)$$

Соответственно условие надежности

$$Q_b/Q_{ult} + M_b/M_{ult} \leq 1. \quad (9)$$

Сущность условия (9) заключается в том, что исчерпание прочности железобетонного элемента по наклонному сечению всегда происходит от совместного действия поперечной силы и момента. Если доля того или иного усилия незначительна, т.е. при $Q_b = 0$ или $M_b = 0$, условие (9) трансформируется в (2) или (3).

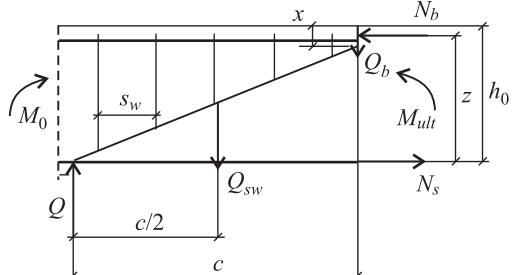


Рис. 1. Схема усилий в наклонном сечении

Параметры Q_b и M_b характеризуют напряженное состояние нормально-го сечения, проходящего через вершину трещин: перерезывающая сила $Q_b = Q - Q_{sw}$ (в этом отличие параметра Q_b от расчетных предпосылок, принятых в нормах проектирования) и изгибающий момент $M_b = Qc - Q_{sw}c/2$.

Предельное состояние нормального сечения железобетонного элемента, частью которого является сжатая зона бетона высотой x , описывается параметрами Q_{ult} и M_{ult} . Предельным значением Q_{ult} характеризуется прочность нормального сечения на срез. Примем Q_{ult} в виде произведения предельного значения касательных напряжений $\tau_{ult} = k_Q R_b$ на площадь сечения сжатой зоны A_b , т.е. $Q_{ult} = k_Q R_b A_b$. Предельное значение момента определяется известными уравнениями «пластического» шарнира $M_{ult} = R_b A_b z$ или $M_{ult} = R_s A_s z$.

Представим уравнение (8) в виде

$$(Q - Q_{sw})/Q_{ult} + (Qc - Q_{sw}c/2)/M_{ult} = 1. \quad (10)$$

Отсюда можно достаточно просто определить значение проекции наклонного сечения по заданному значению Q или разрушающее поперечное усилие при известных значениях параметра c .

Ключевым параметром для расчетной оценки предельного значения Q_{ult} является предельное значение касательных напряжений τ_{ult} , которое обычно отождествляется с сопротивлением бетона срезу (сдвигу) $R_{b,sh}$. Этот параметр по причине малой востребованности не нормируется, недостаточно изучен и требует экспериментального подтверждения.

Расчетные значения сопротивления срезу получают из эмпирической зависимости

$$R_{b,sh} = (0,5..0,7)\sqrt{R_b R_{bt}} \approx 0,22R_b$$

или в виде удвоенного сопротивления бетона растяжению R_{bt} [4, 5]. Но для сжатой зоны бетона изгибаемых элементов это не совсем так. Известно, что разрушение материала на площадках сдвига происходит не только под действием касательных напряжений τ , но и нормальных напряжений σ [6]. Разрушение материалов путем среза хорошо оценивает теория Мора, которая является обобщением теории максимальных касательных напряжений.

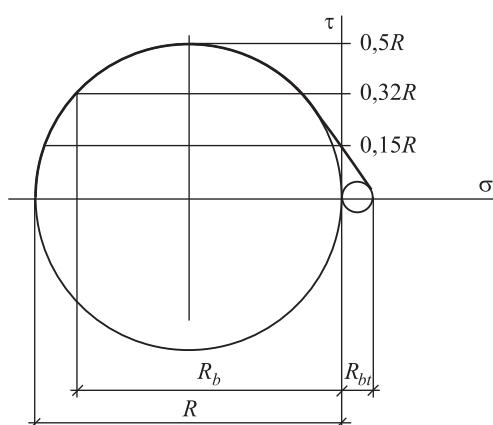


Рис. 2. Схема предельных напряжений по кругам Мора

По кругам Мора можно оценить предельную величину касательных напряжений. На рис. 2 показано, что для предельных величин τ_u возможны значения от $0,15R$ (при $\sigma = 0$) до $0,5R$ (при $\sigma = 0,5R$). Отсюда, учитывая, что $R_b \approx 0,8R$, теоретические значения коэффициента $k_Q \approx 0,2-0,6$.

Вероятность снижения прочности на сжатие также необходимо учитывать как следствие негативного влияния касательных напряжений. Однако здесь следует напомнить, что раньше в качестве

сопротивления сжатию бетона изгибаемых элементов принимали специальный параметр (сопротивление сжатию при изгибе) со значением, приблизительно равным кубиковой прочности, поэтому применение призменной прочности для обобщенного расчета вполне обоснованно.

Анализ опытных данных. Для оценки предельных значений касательных напряжений и проверки зависимости (10) выполнен расчетный анализ экспериментальных данных, извлеченных из сборника [7]. Рассмотрены результаты испытания 15 железобетонных балок прямоугольного сечения, загруженных двумя сосредоточенными силами на расстоянии $c = 2h_0$ от опор. Опытные балки изготовлены из тяжелого бетона, балки 14 и 15 – из мелкозернистого бетона. Основные характеристики опытных изделий, в том числе значения поперечной силы $Q_{\text{оп}}$ при разрушении, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики опытных образцов

Железобетонная балка	Размеры сечения, см		Площадь сечения арматуры, см^2		Шаг хомутов s_w , см	Сопротивления бетона и арматуры, МПа			$Q_{\text{оп}}$, кН
	b	h_0	A_s	A_{sw}		$R (R_b)$	$\sigma_{02} (R_s)$	R_{sw}	
1	15,2	27,0	3,08			26 (19,3)	724 (537)		60
2	15,4	25,8	4,02			26 (19,3)	728 (540)		75
3	15,5	26,0	6,28			26 (19,3)	773 (573)		80
4	15,4	25,8	6,28	0,58	12	26 (19,3)	773 (573)	362	90
5	15,4	25,5	9,82	0,57	12	26 (19,3)	800 (593)	362	86
6	15,5	26,7	2,55			(31)	724 (537)		40
7	15,5	26,8	2,60			(31)	724 (537)		60
8	14,5	26,8	5,86			(31)	773 (573)		70
9	14,7	26,6	5,90			(31)	773 (573)		58
10	15,0	27,0	5,80	0,55	10	(31)	773 (573)	258	102
11	16,0	26,7	5,90	0,55	10	(31)	773 (573)	258	94
12	15,2	26,5	9,60	0,55	10	(31)	800 (593)	258	93
13	15,4	26,0	9,70	0,57	10	(31)	800 (593)	258	98
14	14,4	27,3	5,90			(48)	773 (573)		62
15	14,5	27,0	9,60	0,55	10	(49)	800 (593)	258	150

Учитывая выражения для предельных усилий τ_{ult} , Q_{ult} и M_{ult} , из уравнения (10) получим значения коэффициента k_Q , соответствующие экспериментальным данным, по формуле

$$k_Q = \frac{Q_{\text{оп}} - Q_{sw}}{\left(1 - \frac{Q_{\text{оп}}c - Q_{sw}c/2}{M_{ult}}\right)R_b A_b}, \quad (11)$$

где $A_b = bx$, $M_{ult} = R_b A_b (h_0 - x/2)$.

Результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчета коэффициента k

Железобетонная балка	c , см	$Q_{sw} = R_{sw}A_{sw}$, кН	M_{ult} , кН · м	x , см	k_Q	k_Q среднее
1	54,0		61,5	9,4	0,46	0,45
2	51,6		71	12,1	0,46	
3	52,0		72,5	11,9	0,53	
4	51,6	21	69,8	11,8	0,48	
5	51,0	20,6	67,5	11,5	0,33	
6	53,4		56	4,8	0,28	
7	53,6		57,3	4,9	0,58	
8	53,6		72,4	6,9	0,47	
9	53,2		72,8	6,9	0,32	
10	54,0	14,2	99,1	9,6	0,41	0,385
11	53,4	14,2	100,8	9,2	0,32	
12	53,0	14,2	97,4	9,5	0,33	
13	52,0	14,2	95,6	9,4	0,37	
14	54,6		109,5	6,6	0,20	0,295
15	54,0	14,2	153,9	9,8	0,39	

При определении коэффициента k_Q в случаях, когда исходным параметром прочности указывалась марка бетона на сжатие, приизменную прочность определяли по эмпирической формуле $R_b = R(0,77 - 0,001\bar{R})$.

Относительное значение высоты сжатой зоны принято по формуле

$$\xi = N_s/R_b b h_0 \leq \xi_R.$$

Так как при расчете требовалось учитывать прочность бетона опытных балок, то граничное значение вычисляли по зависимости (по действующим нормам значение ξ_R не зависит от прочности бетона)

$$\xi_R = \frac{\omega}{1 + \sigma_s(1 - \omega/1,1)/400}, \quad (12)$$

где $\omega = 0,85 - 0,008R_b$.

Напряжение σ_s принимали равным расчетному значению R_s арматуры класса А-IV, принятому по нормам проектирования на момент выполнения эксперимента и уточненному по формуле

$$R_s = \sigma_{02}(1 - 1,64\nu) / \gamma_m = \sigma_{02}(1 - 1,64 \cdot 0,067) / 1,2$$

при фактических значениях σ_{02} . Так как в качестве продольной арматуры применяли сталь с условным пределом текучести, в некоторых случаях (при малых значениях ξ) напряжения σ_s принимали в зависимости от временного сопротивления σ_v арматуры класса А-IV.

Таблица 3. Результаты проверочного расчета опытных балок

Железобетонная балка	$\xi = x/h_0$	ξ_R	Q_{ult} , кН	M_{ult} , кН · м	Q_{sw} , кН	Q , кН	Q/Q_{op}	Q/Q_{op} средне-приведенное
1	0,282	0,477	118,9	61,5		58,2	0,97	
2	0,382	0,477	155,1	71		72,9	0,97	
3	0,624	0,456	153,5	72,5		72,3	0,91	
4	0,632	0,456	151,2	69,8	21,0	86,9	0,97	
5	1,037	0,451	147,3	67,5	20,6	84,9	0,99	
6	0,143	0,374	85,7	56		47,2	1,18	0,95
7	0,146	0,374	87,5	57,3		48,1	0,80	
8	0,376	0,365	115,3	72,4		62,2	0,89	0,98
9	0,376	0,365	116,8	72,8		63,0	1,09	
10	0,357	0,365	165,9	99,1	14,2	97,9	0,96	1,01
11	0,344	0,365	169,6	100,8	14,2	100,1	1,06	
12	0,640	0,360	166,3	97,4	14,2	98,1	1,05	1,03
13	0,625	0,360	166,8	95,6	14,2	98,3	1,00	
14	0,242	0,400	164,2	109,5		90,3	1,46	
15	0,400	0,363	245,5	153,9	14,2	143,4	0,96	

Расчетные значения Q для сравнения с опытными результатами получены из уравнения (10)

$$Q = \frac{Q_{ult} M_{ult}}{M_{ult} + Q_{ult} c} + \frac{Q_{sw}(M_{ult} + Q_{ult} c/2)}{M_{ult} + Q_{ult} c}. \quad (13)$$

При отсутствии поперечного армирования второе слагаемое зависимости (13) не учитывали. Размеры сжатых зон сечений опытных балок определяли по среднему значению предельного касательного напряжения $\tau_{ult} = 0,32R$ и призменной прочности R_b . Результаты проверочного расчета опытных балок приведены в табл. 3.

Анализ результатов расчетов. В целом результаты проверочного расчета опытных балок близки к результатам испытаний. Следует отметить значительные отклонения от средних значений поперечной силы в малых выборках, состоящих из пар балок–близнецовых (6-7, 8-9, 10-11 и 12-13).

Не совпадают данные по балкам, изготовленным из мелкозернистого бетона (балки 14 и 15). Обнаружено, что причиной значительных отклонений результатов по балке 15 является применение формулы (13) для изделий из мелкозернистого бетона. При использовании формулы

$$\xi_R = \frac{0,7}{1 + \varepsilon_s / \varepsilon_b}$$

из действующих норм проектирования влияние неточности определения относительного значения высоты сжатой зоны удалось устраниТЬ. Что касается

результатов расчета балки 14, то здесь, очевидно, проявилось влияние низкой прочности на срез мелкозернистого бетона $k_Q = 0,2$ (см. табл. 2). Известно, что прочность бетона на срез в значительной степени зависит от крупности заполнителя [4].

Представляют интерес соотношения слагаемых уравнения (10), полученные в результате расчета. В целом эти слагаемые приблизительно равны. Наибольшая разница получена по результатам расчета балки 4:

$$Q_b/Q_{ult} : M_b/M_{ult} = 0,435 : 0,565.$$

Отмечена также зависимость коэффициента k_Q от прочности бетона: средние значения коэффициента уменьшаются при увеличении прочности бетона (см. табл. 2).

Применение предлагаемой модели с четким физическим смыслом расчетных параметров позволяет значительно упростить оценку прочности на действие поперечной силы при проектировании изгибающихся железобетонных элементов.

Приведем примеры расчетов и сравним результаты с нормативными требованиями.

Пример 1. Определить несущую способность балки без поперечного армирования наклонных сечений при наличии сосредоточенной нагрузки на расстоянии 0,6 м от опоры.

Исходные данные: размеры прямоугольного сечения $b = 20$ см и $h_0 = 27$ см; площадь сечения продольной арматуры класса А 400 ($R_s = 360$ МПа, модуль упругости $E_s = 200\,000$ МПа) по всей длине балки $A_s = 6,28$ см², призменная прочность тяжелого бетона $R_b = 10$ МПа, сопротивление бетона срезу $R_{b,sh} = 0,2R_b = 2$ МПа. Изгибающий момент от расчетных нагрузок $M = 45$ кН · м, поперечная сила $Q = 30$ кН.

Границное значение относительной высоты сжатой зоны нормального сечения $\xi_R = 0,8/(1 + 360/200\,000 \cdot 0,0035) = 0,528$. Относительная высота сжатой зоны $\xi = 360 \cdot 0,000628/10 \cdot 0,2 \cdot 0,27 = 0,419 < \xi_R$. Высота сжатой зоны $x = 0,419 \cdot 0,27 = 0,113$ м. Несущая способность нормальных сечений по изгибающему моменту $M_{ult} = 10 \cdot 0,2(0,27 - 0,113/2)0,113 \cdot 1000 = 48,25$ кН · м $> M$. Несущая способность сжатой зоны на срез $Q_{ult} = 2 \cdot 0,2 \times 0,113 \cdot 1000 = 45,2$ кН.

Пренебрегая влиянием собственного веса балки в пределах наклонного сечения, по условию (9) получаем $30/45,2 + 30 \cdot 0,6/48,25 = 1,04 > 1$. Это означает, что несущая способность балки с проекцией наклонного сечения до $c = 0,6$ м без поперечного армирования не обеспечена.

При $R_{bt} = 0,8$ МПа по действующим нормам проектирования

$$Q_b = 0,5 \cdot 0,8 \cdot 0,2 \cdot 0,27 \cdot 1000 = 21,6 \text{ кН} < Q,$$

т.е. также несущая способность балки без поперечного армирования не обеспечена.

Пример 2. По данным примера 1 определить проекцию наклонного сечения без поперечного армирования при произвольном загружении (без учета влияния внешней нагрузки на балке, расположенной в пределах наклонных сечений).

Из формулы (10) получено $c = M_{ult}(1/Q - 1/Q_{ult}) = 0,54$ м. Следует обратить внимание на простоту формулы и прямо пропорциональную за-

висимость проекции наклонного сечения от несущей способности по моменту.

По действующим нормам проектирования при $R_{bt} = 0,8$ МПа длина проекции наклонного сечения $c = 1,5 \cdot 0,8 \cdot 0,2 \cdot 0,27^2 \cdot 1000/30 = 0,58$ м.

Заключение. Несущая способность железобетонных элементов по наклонным сечениям зависит от прочности сжатой зоны над наклонной трещиной на действие поперечных сил и изгибающих моментов. Основой аналитического выражения для определения несущей способности может быть расчетная модель (10), которая имеет реальную физическую природу.

Предлагаемую расчетную модель можно применять не только для оценки прочности наклонных сечений, но и для определения проекции опасного наклонного сечения.

Расчетные значения сопротивлений бетона сжатой зоны на срез требуют экспериментального уточнения с целью обеспечения необходимой надежности железобетонных элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций / Под ред. А.А. Гвоздева. М.: Стройиздат, 1978. 204 с.
2. Звездов А.И., Залесов А.С., Мухамедиев Т.А., Чистяков Е.А. О новых нормах проектирования железобетонных и бетонных конструкций // Бетон и железобетон. 2002. № 2. С. 2–6.
3. Краснощеков Ю.В. Прочность железобетонных элементов по наклонным сечениям при совместном действии поперечных сил и моментов // Вестн. СибАДИ. 2009. № 3. С. 46–50.
4. Кудзис А.П. Железобетонные и каменные конструкции: В 2 ч. Ч. 1. Материалы, конструирование, теория и расчет. М.: Вышш. шк., 1988. 287 с.
5. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Расчетно-теоретический: В 2 кн. Кн. 1 / Под ред. А.А. Уманского. М.: Стройиздат, 1972. 600 с.
6. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1976. 856 с.
7. Новое о прочности железобетона / Под ред. К.В. Михайлова. М.: Стройиздат, 1977. 272 с.

Краснощеков Юрий Васильевич, д-р техн. наук, доц.; E-mail: uv1942@mail.ru
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск

Получено после доработки 12.10.17

Krasnoshchekov Yuriy Vasil'evich, DSc, Ass. Professor; E-mail: uv1942@mail.ru
Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

THE BEARING CAPACITY FOR INCLINED SECTIONS REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER JOINT THE IMPACT OF TRANSVERSE FORCES AND MOMENTS

Proposed a generalized computational model of the bearing capacity of reinforced concrete elements on the inclined cross sections, taking into account the joint action of shear forces

and bending moments. The model is built on the premise of complex stress state of the normal sections passing through the top of the inclined cracks, under the action of shear and bending forces. The proposed model can be used to determine the length of the projection of the inclined section. The model adequacy is confirmed comparing the calculation results and the previously executed test beams. It is concluded that one of the main regulators of the reliability of reinforced concrete elements calculated according to the generalized model, is the design value of the shear resistance of the compressed concrete.

K e y w o r d s: strength of concrete, sloping section, the shear force, moment, generalized analysis model, the resistance of the concrete shear.

REFERENCES

1. Novoe v proektirovani betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy [New in the design of concrete and reinforced concrete structures]. Moscow, Stroyizdat, 1978. 204 p. (in Russian)
2. Zvezdov A.I., Zalesov A.S., Mukhamediev T.A., Chistyakov E.A. O novykh normakh proektirovaniya zhelezobetonnykh i betonnykh konstruktsiy [The new rule of design of reinforced concrete and concrete structures]. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 2002. No. 2. Pp. 2–6. (in Russian)
3. Krasnoshchekov Yu.V. Prochnost' zhelezobetonnykh elementov po naklonnym secheniyam pri sovmestnom deystvii poperechnykh sil i momentov [Strength of reinforced concrete elements on the inclined section under the joint action of the transverse forces and moments]. Vestnik SibADI. 2009. No. 3. Pp. 46–50. (in Russian)
4. Kudzis A.P. Zhelezobetonnye i kamennye konstruktsii [Concrete and stone structures]. Moscow, 1988. 287 p. (in Russian)
5. Spravochnik proektirovshchika promyshlennykh, zhilykh i obshchestvennykh zdaniy i sooruzheniy. Raschetno-teoreticheskiy [Directory of designer industrial, residential and public buildings. Theoretical]. Moscow, 1972. 600 p. (in Russian)
6. Belyaev N.M. Soprotivlenie materialov [Mechanics of materials]. Moscow, 1976. 856 p. (in Russian)
7. Novoe o prochnosti zhelezobetona [New about strength of concrete]. Moscow, 1977. 272 p. (in Russian)

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ



УДК 691.327:666.972.53

Г.И. ОВЧАРЕНКО

ВЫСКОМОРОЗОСТОЙКИЙ ШЛАКОСОДЕРЖАЩИЙ ЦЕМЕНТНЫЙ БЕТОН

Проведен анализ химического и фазового состава высокоморозостойких бетонов на основе шлакосодержащих вяжущих. Экспериментально показано, что на основе шлака с содержанием 25–29 % CaO, около 25 % SiO₂ и 40 % оксидов железа получен шлакопортландцемент (ШПЦ) и бетон на его основе с морозостойкостью более 500 циклов без признаков разрушения. Методами ДТА и мессбауэровской спектроскопии установлено образование ферригидратов трехвалентного железа в процессе гидратации ШПЦ. Сделан вывод о влиянии геля ферригидратов на формирование бетонов высокой морозостойкости.

Ключевые слова: высокожелезистые шлаки, шлакопортландцемент, мессбауэровская спектроскопия, ферригидраты, высокоморозостойкий бетон.

Исследование морозостойкости цементных бетонов позволило ученым сформулировать несколько универсальных положений, которые используются в практическом проектировании суперстойких материалов. Главные положения по получению высокоморозостойких бетонов заключаются в следующем [1–3]:

- нужно уменьшить В/Ц бетона до исчезновения в нем капиллярной пористости, т.е. менее 0,38;
- необходимо обеспечить воздухововление в бетонную смесь, способствующее хорошей работе камня в условиях замораживания и оттаивания;
- параметры воздухововления должны быть такими, чтобы получить диаметр пор менее 250–300 мкм;
- наконец, нужно учитывать формирование собственной микроструктуры камня того или иного минералогического состава [2–4].

К последнему положению относится:

- запрет на применение цементов с повышенным содержанием алюмината в клинкере, приводящее к открытой микропористости;
- использование микрокремнезема совместно с суперпластификаторами, которые уменьшают дефектность микроструктуры камня за счет связывания портландита и модификации микроструктуры фазы C–S–H(II).

Экспериментальные исследования С.И. Павленко цементно-(золо)шлаковых бетонов на основе кислых топливных гранулированных шлаков установили их морозостойкость до 1500 циклов, в том числе без потери прочности до 1000 циклов [5].

Наши исследования морозостойкости бетона на основе шлакопортландцемента (ШПЦ) с содержанием около 30 % экспериментального никелевого шлака повышенной основности (CaO около 25–29 %) показали, что бетон после 523 циклов увеличил прочность от 32 до 46 МПа без признаков разрушения [6]. Далее эксперименты были прекращены, так как они проводились прямым (базовым) методом.

Экспериментальные данные позволили предположить наличие еще одного положительного эффекта при получении высокоморозостойкого камня, который заключается в образовании тонкодисперсных частиц Fe(OH)_3 и других ферригидратов в процессе гидратации вяжущих определенного химико-минерalogического состава. Тонкодисперсные ферригидраты должны кольматировать дефекты микроструктуры цементного камня, усиливать вяжущие свойства таких твердых гелей, как фаза C–S–H.

Применение солей железа для повышения плотности и непроницаемости цементного камня известно и используется на практике [7]. Однако образующиеся ферригидраты при гидратации специальных шлаковых вяжущих должны обладать большим эффектом, так как они выделяются непосредственно в зоне формирования основных фаз цементного камня (*in situ*).

Целью данного исследования является проверка положения, что высокая морозостойкость бетона обусловлена образованием тонкодисперсных ферригидратов при гидратации ШПЦ на основе высокожелезистого шлака определенного химического состава.

Материалы и методы исследования. В эксперименте использовали шлакопортландцемент на основе специального никелевого шлака повышенной основности с химическим и фазовым составами, указанными в табл. 1, 2.

Фазовый анализ шлаков проводили рентгеновским (ДРОН-2), микрорентгеноспектральным (микрозонд, Камека MS-46) и химическим методами. Фазовый анализ цементного камня ШПЦ осуществляли мессбауэровским (спектрометр Вариан, тип 60), термическим (дериватограф Паулик, Эрдеи) и рентгеновским методами.

ШПЦ получали в лабораторной и промышленной шаровой мельницах на основе клинкеров Ачинского и Норильского заводов с содержанием 30 % шлака. Цементы по всем показателям отвечали требованиям ГОСТ 10178–85.

Т а б л и ц а 1. Химический состав экспериментальных высокожелезистых шлаков

Шлак, №	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _{общ}	CaO	MgO	SO ₃
13	31,3	4,5	58,3	3,4	1,1	3,5
1	25,4	9,9	40,5	25,4	2,6	3,5
4	25,9	8,4	42,1	24,2	2,9	3,6
20	23,6	7,2	39,2	29,4	2,4	4,1

П р и м е ч а н и е. Состав № 13 – кислый никелевый шлак.

Таблица 2. Состав фаз гранулированного шлака № 1 по данным микрозонда

Фаза	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	Сумма
Шлак (валовый состав)	24,3	27,0	7,8	4,7	—	31,9	95,7
Стекло	34,9	34,9	7,1	4,3	—	17,2	98,4
Магнетит	—	0,5	8,0	5,4	6,7	71,6	92,2
Хромит	—	0,4	19,3	6,4	20,1	53,5	99,7

Причина. Микрозонд не смог оценить состав дендритов виостита размером около 0,5 мкм, содержащихся в количестве около 20 %.

При остатке на сите № 008 9–10 % их удельная поверхность составляла 300–320 см²/г. Активность ШПЦ при 30 % шлака 33,2 МПа.

Бетонные смеси с ОК = 5 см имели состав, кг/м³: щебень – 1200; песок – 680; ШПЦ 300–400; ЛСТ – 0,8; СНВ – 0,05. Подробные составы приведены в табл. 3.

Таблица 3. Составы бетонных смесей с ОК = 5 см

Компоненты бетонных смесей	Содержание компонента, кг/м ³ , в составе				
	1	2	3	4	5
Щебень фракции 20–40 мм	520	490	465	490	490
Щебень фракции 5–20 мм	780	740	700	740	740
Песок березовский	680	650	620	650	650
Опытный ШПЦ	300	400	500	400	
Портландцемент из ачинского клинкера	—	—	—	—	400
ЛСТ	—	—	—	0,8	—
СНВ	—	—	—	0,05	—
Вода	180	193	197	162	204

Результаты и их обсуждение. Кислый шлак № 13 (см. табл. 1) по данным РФА представлен в основном стеклом с незначительной кристаллизацией фаялита Fe₂[SiO₄] и оливина (Mg, Fe)₂[SiO₄] (здесь и далее межплоскостные расстояния в кристаллах даны в 10⁻¹⁰ м: 3,35; 2,81; 2,49; 1,77), магнетита Fe₃O₄ (3,019; 2,542; 2,083). В шлаке № 1 отмечаются виостит FeO (2,46; 2,13; 1,50), магнетит Fe₃O₄ (2,94; 2,51; 2,13), окерманит Ca₂Mg[Si₂O₇] (C₂MS₂) (2,94; 2,51). В шлаке № 20: виостит, магнетит, незначительно окерманит и более значительно мервинит Ca₃Mg[SiO₄]₂ (C₃MS₂) (2,66; 1,92; 1,85; 1,54) и β-C₂S.

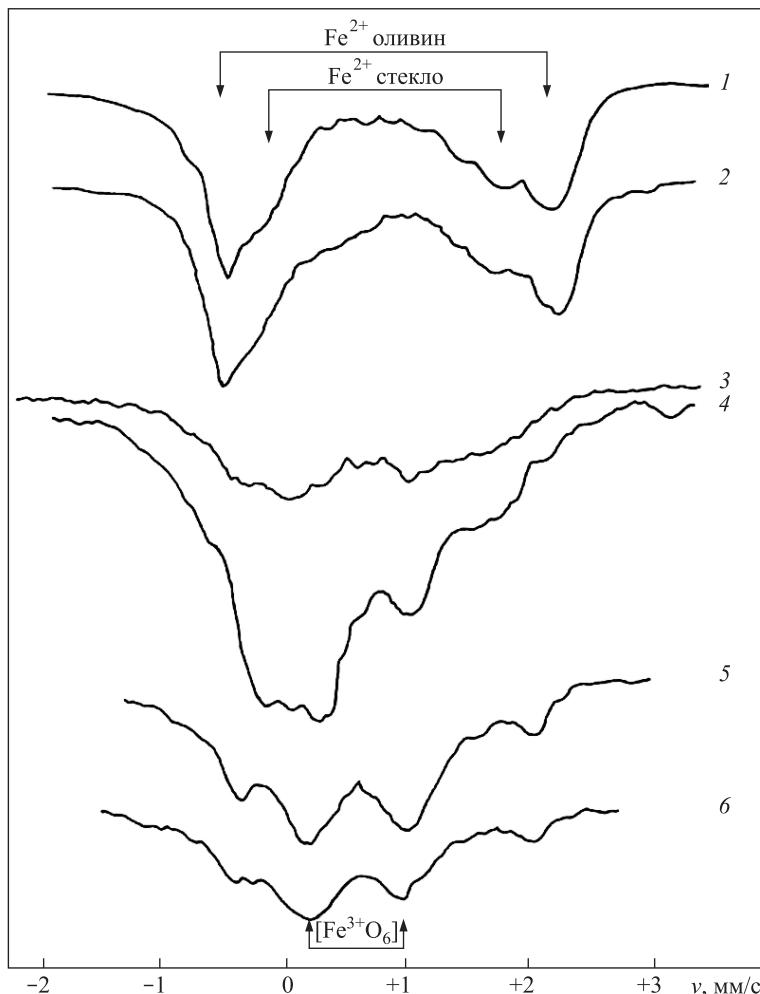
Микрорентгеноспектральный анализ выявил присутствие в шлаке № 1 фаз по табл. 2. Дополнительно в шлаке отмечаются дендриты виостита, которые не обнаруживаются микрозондом из-за малого размера кристаллов в 0,5 мкм.

Исследование камня твердевшего ШПЦ показало, что помимо типичных гидратных фаз в виде портландита и геля C–S–Н в продуктах гидратации определяется гетит FeOOH или в современной терминологии – ферригидраты: ДТА – 300 °С [8, 9].

Это подтверждают данные мессбауэровской спектроскопии (рисунок).

Исходный кислый шлак содержит катионы железа Fe^{2+} в стеклофазе и в оливине (кривая 1). Гидратация этого шлака в составе ШПЦ не приводит к заметному изменению заряда катионов железа и их координации по кислороду (кривая 2). Иная картина у железосодержащих фаз в известьсодержащих шлаках повышенной (по извести) основности.

Исходные шлаки № 1 и особенно № 20 содержат трехвалентные катионы железа (кривые 3 и 5), доля которых значительно увеличивается при гидратации (кривые 4 и 6). Это обусловлено самопроизвольным окислением ионов железа с повышением основности шлаков, а также в процессе его гидратации.



Мессбауэровские спектры исходных и гидратированных ШПЦ на шлаках разной основности

1, 3, 5 – исходные ШПЦ; 2, 4, 6 – гидратированные ШПЦ 28 сут;
1, 2 – шлак № 13; 3, 4 – шлак № 1; 5, 6 – шлак № 20 по табл. 1 и 2

Таблица 4. Прочность при сжатии бетонов

Продолжительность пропарки при 80 °С, ч	Срок твердения в нормальных условиях, сут	Состав бетона, №				
		1	2	3	4	5
4	Нет	13,1	21,6	28,7	—	23,8
4	28	24,7	30,7	43,6	33,5	35,5
Нет	7	14,5	22,1	28,7	—	25,4
Нет	28	18,6	25,6	37,2	32,3	31,8

Следовательно, можно говорить об образовании большого количества ферригидратов трехвалентного железа, обеспечивающих формирование тонкодисперсных железосодержащих фаз.

Бетонные смеси (табл. 3) на основе ШПЦ с 30 % шлака № 1 и ачинского клинкера твердели при пропаривании и в нормальных условиях (табл. 4).

Бетон на экспериментальном ШПЦ (на основе высококальциевого железистого шлака № 1) не уступал по прочности бетону на ачинском безд饱满ном портландцементе (составы № 4 и 5). Это обусловлено пониженной на 20 % водопотребностью смесей на основе ШПЦ. Однако бетон с воздуховлекающими добавками на ачинском цементе выдержал только 250 циклов морозостойкости, а состав № 4 – после 523 циклов увеличил прочность до 46 МПа и не показал признаков морозного разрушения.

Подобные описанным процессы возможны и при использовании топливных шлаков и зол в цементных бетонах, особенно среднекальциевых, содержащих 10–15 % $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ и по 20–30 % CaO и SiO₂ [5, 10]. Поэтому данные С.И. Павленко [5] могли быть достигнуты, в том числе и из-за этого эффекта.

Вывод. Высокожелезистые шлаки повышенной основности с содержанием 25–29 % CaO, около 25 % кремнезема и 40 % оксидов железа при гидратации в составе ШПЦ образуют в цементном камне повышенное количество ферригидратов трехвалентного железа, что обеспечивает бетону на таком ШПЦ морозостойкость более 500 циклов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Pigeon M., Pleau R. Durability of Concrete in Cold Climates. Taylor and Francis, 1995. 230 p.
- Штарк И., Вихт Б. Долговечность бетона / Пер. с нем. А. Тулаганова; под ред. П. Кривенко. Киев: Оранта, 2004. 301 с.
- Шестопров С.В. Технология бетона: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1977. 432 с.
- Boos P., Giergiczny Z. Testing the frost resistance of concrete with different cement types – experience from laboratory and practice // Proceedings the Silesian University of Technology. 2010. No. 2. P. 41–51.
- Павленко С.И. Мелкозернистые бетоны из отходов промышленности: Учеб. пособие. М.: Изд-во АСВ, 1997. 176 с.

6. Овчаренко Г.И., Боженов П.И., Григорьев Б.А. Шлакопортландцемент с применением высококальциевых никелевых шлаков // Цемент. 1986. № 6. С. 13–14.
7. Чехов А.П., Сергеев А.М., Дубров Г.Д. Справочник по бетонам и растворам. 3-е изд. Киев: Будивельник, 1983. 216 с.
8. Campbell A.S., Schwertmann U., Campbell P.A. Thermal analysis of ferrihydrite // Proceedings of the 10th International Clay Conference. Adelaide, South Australia, Abstracts, 1993. Р. 0–26.
9. Childs C.W. Ferrihydrite: A review of structure, properties and occurrence in relation to soils // Zeitschrift für Pflanzenernaehrung und Bodenkunde. 1992. Vol. 155, No. 5. Р. 441–448.
10. Овчаренко Г.И. Золы углей КАТЭКа в строительных материалах. Красноярск: Изд-во Краснояр. гос. ун-та, 1992. 216 с.

Овчаренко Геннадий Иванович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: egogo1980@mail.ru
Алтайский государственный технический университет, г. Барнаул

Получено 23.10.17

Ovcharenko Gennadiy Ivanovich, DSc, Professor; E-mail: egogo1980@mail.ru
Altai State Technical University, Barnaul, Russia

HIGH FROST-RESISTANT SLAG-CONTAINING CEMENT CONCRETE

The analysis of the chemical and phase composition of highly frost-resistant concrete on the basis of slag-containing binders is carried out. It was experimentally shown that slag Portland cement and concrete on its basis with a frost resistance of more than 500 cycles without signs of destruction were obtained on the basis of slag with 25–29 % CaO, 25 % SiO₂, and 40 % iron oxides. DTA and Mossbauer spectroscopy have shown the formation of a large amount of tri-valent iron ferrihydrates during the hydration of the slag cement. A conclusion is drawn on the effect of the ferric hydrate gel on the formation of high-frost-resistant concrete.

К e y w o r d s: high iron slag, slag Portland cement, Mossbauer spectroscopy, ferrihydrates, highly frost-resistant concrete.

REFERENCES

1. Pigeon M., Pleau R. Durability of Concrete in Cold Climates. Taylor and Francis, 1995. 230 p.
2. Stark J., Wicht B. Dolgovechnost' betona [Durability of concrete]. Kiev, Oranta, 2004. 301 p. (in Russian)
3. Shestopalov S.V. Tekhnologiya betona [Technology of concrete]. Moscow, Higher School, 1977. 432 p. (in Russian)
4. Boos P., Giergiczny Z. Testing the frost resistance of concrete with different cement types – experience from laboratory and practice. Proceedings of the Silesian University of Technology. 2010. No. 2. Pp. 41–51.
5. Pavlenko S.I. Melkozernistye betony iz otkhodov promyshlennosti: uchebnoe posobie [Fine-grained concretes from industrial wastes: Textbook]. Moscow, Publishing House of the DIA, 1997. 176 p. (in Russian)

6. Ovcharenko G.I., Bozhenov P.I., Grigoriev B.A. Shlakoportlandsement s primeniem vysokokal'tsievых никелевых шлаков [Shlakoportlandsement with the use of high-calcium nickel slags]. Tsement [Cement]. 1986. No. 6. Pp. 13–14. (in Russian)
7. Chekhov A.P., Sergeev A.M., Dibrov G.D. Spravochnik po betonam i rastvoram [Handbook of concretes and solutions]. Kiev, Budivelnyk, 1983. 216 p. (in Russian)
8. Campbell A.S., Schwertmann U., Campbell P.A. Thermal analysis of ferrihydrite. Proceedings of the 10th International Clay Conference, Adelaide, South Australia, Abstracts, 1993. Pp. 0–26.
9. Childs C.W. Ferrihydrite: A review of the structure, properties and occurrence in relation to soils. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde. 1992. Vol. 155, No. 5. Pp. 441–448.
10. Ovcharenko G.I. Zoly ugley KATEKa v stroitel'nykh materialakh [Ashes of KATEK coals in building materials]. Krasnoyarsk, 1992. 216 p. (in Russian)

УДК 697.327 : 666.973

О.А. МИРЮК

О ФОРМИРОВАНИИ ВЫСОКОПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрена возможность создания высокопористых материалов на основе каустического магнезита. Представлены результаты экспериментальных исследований способов поризации магнезиальных композиций. Определено влияние техногенных наполнителей на формирование пористой структуры магнезиальных материалов. Предложены технологические решения, направленные на интенсификацию твердения магнезиальных пенобетонов. Показано преимущество комбинированных ячеисто-зернистых структур магнезиальных материалов, образованных при сочетании пеномассы с поризованными гранулами. Приведены результаты исследований структуры и свойств пористых магнезиальных материалов. Сформулированы принципы создания высокопористых магнезиальных композиций.

Ключевые слова: пористость, ячеистый бетон, комбинированная структура, магнезиальные материалы.

Наибольшее распространение материалов ячеистой структуры обусловлено технологическими и теплоизоляционными преимуществами. Ячеистые бетоны характеризуются доступностью сырьевой базы и простотой технологии изготовления, высокой надежностью и экономичностью в эксплуатации. Поризацию формовочной массы для изделий ячеистой структуры осуществляют химическим, механическим, механохимическим, физическим способами [1–3]. Для улучшения прочностных и теплозащитных свойств ячеистых бетонов необходимо оптимизировать структуру, что может быть достигнуто за счет совершенствования приемов поризации [1, 4–7].

Магнезиальные вяжущие характеризуются интенсивным твердением и высокой прочностью камня, это предопределяет возможность надежного закрепления пористой структуры бетона [8, 9]. Разработки высокопористых магнезиальных материалов малочисленны и посвящены пеномагнезиту [10, 11].

Цель работы – исследование способов формирования высокопористой структуры магнезиальных композиционных материалов.

В экспериментах использовали каустический магнезит марки ПМК-75, содержащий 85–90 % активного MgO. В качестве минеральных наполнителей в вяжущее вводили металлургические шлаки и отходы обогащения скарново-магнетитовых руд. Вяжущие затворяли водным раствором MgCl₂. Пористую структуру формировали с помощью пенообразователя «Унипор», газообразователя перекиси водорода. Для приготовления формовочных масс применяли гранулированные материалы: зольная микросфера – полые частицы размером 100–500 мкм с насыпной плотностью 350–400 кг/м³; пенополистирол диаметром 3–5 мм, полученный при разрушении упаковок. Приготовление пеномасс осуществляли в смесителе миксерного типа со скоростью вращения вала 600–900 об./мин. Физико-механические свойства бетонов опре-

деляли на образцах с ребром 40 мм. Микроструктуру материалов исследовали на растровом электронном микроскопе JSM-6490LV Energy.

Выраженная химическая активность солевого затворителя магнезиальных материалов обусловила выбор протеинового пенообразователя с высокой вспенивающей способностью и устойчивостью в среде раствора хлорида магния. Мелкопористая пена обеспечивается при введении протеинового пенообразователя в раствор $MgCl_2$ плотностью 1200–1250 кг/м³.

Исследованы пеномассы различного приготовления (табл. 1). Одностадийный способ, предусматривающий вспенивание сырьевой суспензии, представляется рациональным. Одновременное перемешивание всех компонентов смеси обеспечивает однородную структуру из замкнутых ячеек.

Таблица 1. Влияние способа приготовления на свойства пеномассы

Способ приготовления	Объем пеномассы, %	Плотность пенобетона, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа
Традиционный (трехстадийный)	100	470	2,8
Метод сухой минерализации пены (двухстадийный)	95	410	3,7
Вспенивание (одностадийный)	78	580	6,5

Введение техногенных наполнителей повышает пористость вспененных магнезиальных композиций. Для бетонов плотностью до 500 кг/м³ содержание наполнителей следует ограничить 30 %. Это обусловлено снижением прочности поризованных композитов, вследствие уменьшения активизирующей способности $Mg(OH)_2$; экранирующего действия пенообразователя (табл. 2).

Для снижения отрицательного воздействия пенообразователя на твердение магнезиальных материалов смешанное вяжущее подвергали механоактивации в мельнице вибрационного действия. Активация вяжущего интенсифицирует структурообразование и сокращает на 30–35 % время твердения бетонной смеси до приобретения структурной прочности. Для приготовления формовочных масс принят способ, предусматривающий дробное введение затворителя и обеспечивающий первичный контакт вяжущего с высококонцентрированным раствором $MgCl_2$. Это инициирует активную гидратацию MgO , опережая воздействие пенообразователя.

Таблица 2. Влияние вида наполнителя на свойства магнезиального пенобетона

Наполнитель вид	Кратность пеномассы		Плотность бетона, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа
	содержание, %			
Нет	0	3,1	490	3,6
Металлургический шлак	30	2,5	485	1,9
	50	2,6	470	1,2
Отходы обогащения скарново-магнетитовых руд	30	3,3	470	2,4
	50	3,4	455	1,5

Таблица 3. Свойства магнезиальных поризованных композиций

Порообразующий компонент	Диаметр расплыва массы, мм	Плотность бетона, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа
Нет	250	1500	22,5
Пенообразователь	230	580	4,0
Перекись водорода	240	650	5,3
Зольная микросфера	270	1350	14,7
Гранулы пенополистирола	150	470	2,0

Для образования газовой фазы в магнезиальных массах использована перекись водорода в количестве 0,5–5,0 %, что обеспечило формирование ячеек повышенной крупности. Исследовано влияние пористых частиц, введенных в магнезиальные массы для формирования зернистой структуры (табл. 3). Добавление 2–20 % зольной микросферы снижает плотность магнезиальной композиции на 5–15 %. При содержании 2–5 % микросферы возрастает подвижность формовочной массы. Введение 5–10 % гранул пенополистирола обеспечивает крупнозернистую структуру композиционного материала плотностью 470–650 кг/м³.

Создание комбинированных структур направлено на улучшение теплоизоляционных свойств материалов за счет формирования зернисто-ячеистого, зернисто-волокнистого и иного сложного строения [2, 5–7]. Для получения магнезиального композиционного материала пониженной плотности предложено сочетание способов поризации (табл. 4).

Добавление в пеномассу перекиси водорода сопровождается снижением крупности пор газообразования, появлением в межпоровых перегородках мелких ячеек пенообразования (рис. 1).

Таблица 4. Влияние способа поризации на свойства магнезиальных композиций

Способ образования пор	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/(м · °C)	Прочность при сжатии, МПа
Пенообразование	525	0,07	4,3
Газообразование	650	0,09	5,3
Пенообразование + газообразование	390	0,05	2,7
Пенообразование + микросфера	435	0,08	3,6
Пенообразование + гранулы пенополистирола	285	0,05	1,0
Пенообразование + гранулы пеностекольные	350	0,05	3,2
Пенообразование + газообразование + гранулы пенополистирола	220	0,04	0,8

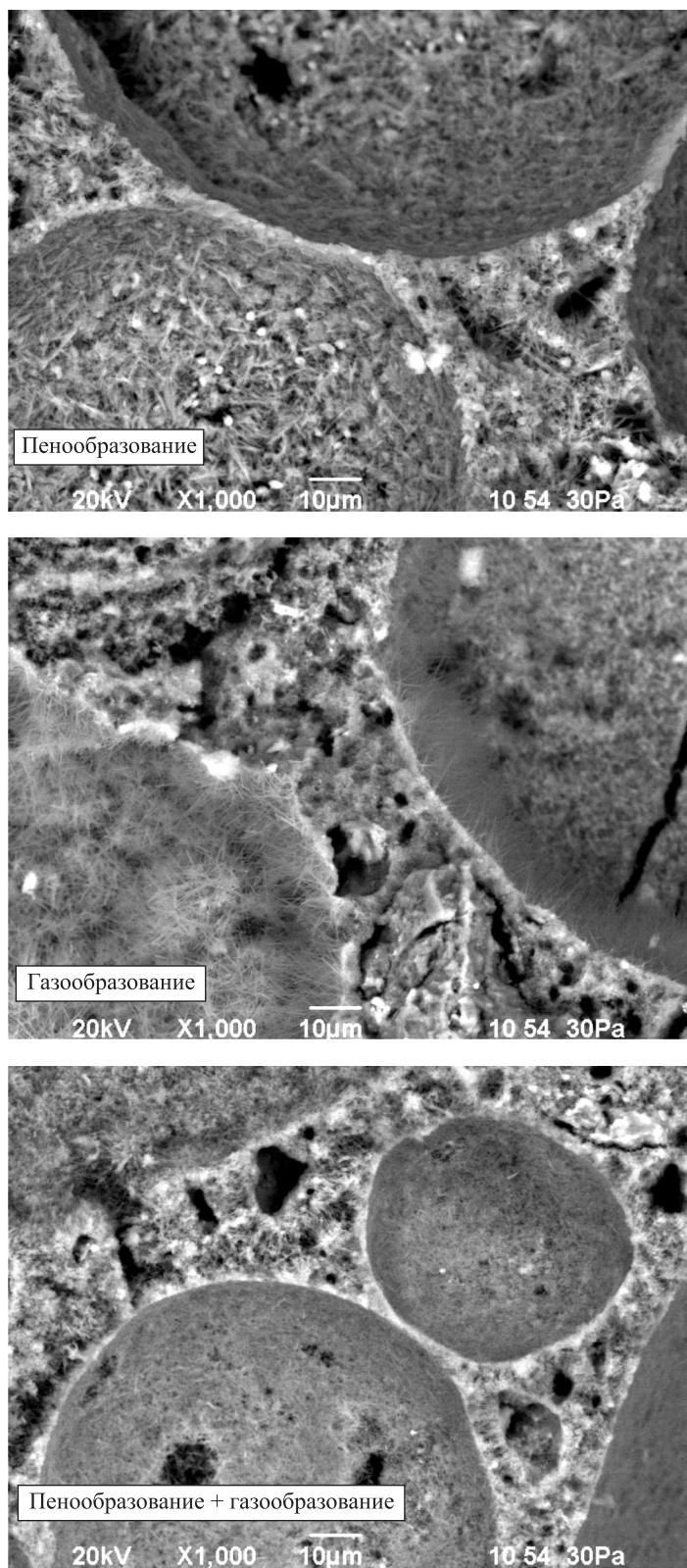


Рис. 1. Микроструктура ячеистых композитов различной поризации

Показана возможность дополнительной поризации пеномассы и создания комбинированной ячеисто-зернистой структуры за счет 5–20 % пористых гранул. При введении гранул пенополистирола в пеномассу плотность уменьшилась в 1,8 раза. Добавление пеностекольных гранул с насыпной плотностью 150 кг/м³ снижает плотность вспененного материала на 33 %. Введение зольной микросферы способствует уплотнению межпоровых перегородок, сохранению замкнутого характера ячеек (рис. 2).

В качестве волокнистого компонента комбинированных структур использована некондиционная шерсть, отходы производства минеральной ваты. Техногенные волокна (3 %) обеспечивают армирование межпоровых перегородок ячеистой структуры (см. рис. 2). Введение волокон повышает вязкость и усложняет получение однородной формовочной массы. Для магнезиальных материалов, характеризующихся наличием волокнистых

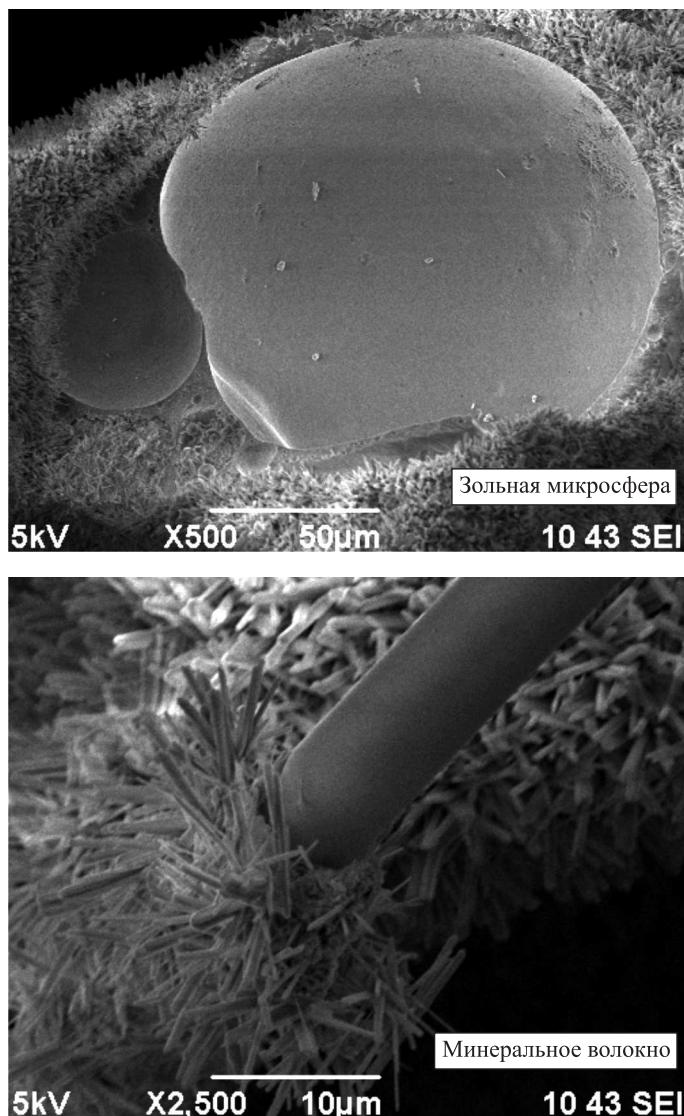


Рис. 2. Микроструктура композитов с различными наполнителями

кристаллов гидрооксихлоридов магния, присутствие «инородных» фибр в ячеистой структуре представляется нецелесообразным.

Вид порообразователя влияет на характер гидратации магнезиальной композиции (рис. 3). При использовании перекиси водорода формируются тонковолокнистые кристаллы гидрооксихлоридов магния, обеспечивающие повышенную прочность композиции.

Обобщение результатов исследований позволило сформулировать некоторые принципы создания высокопористых композиционных материалов.

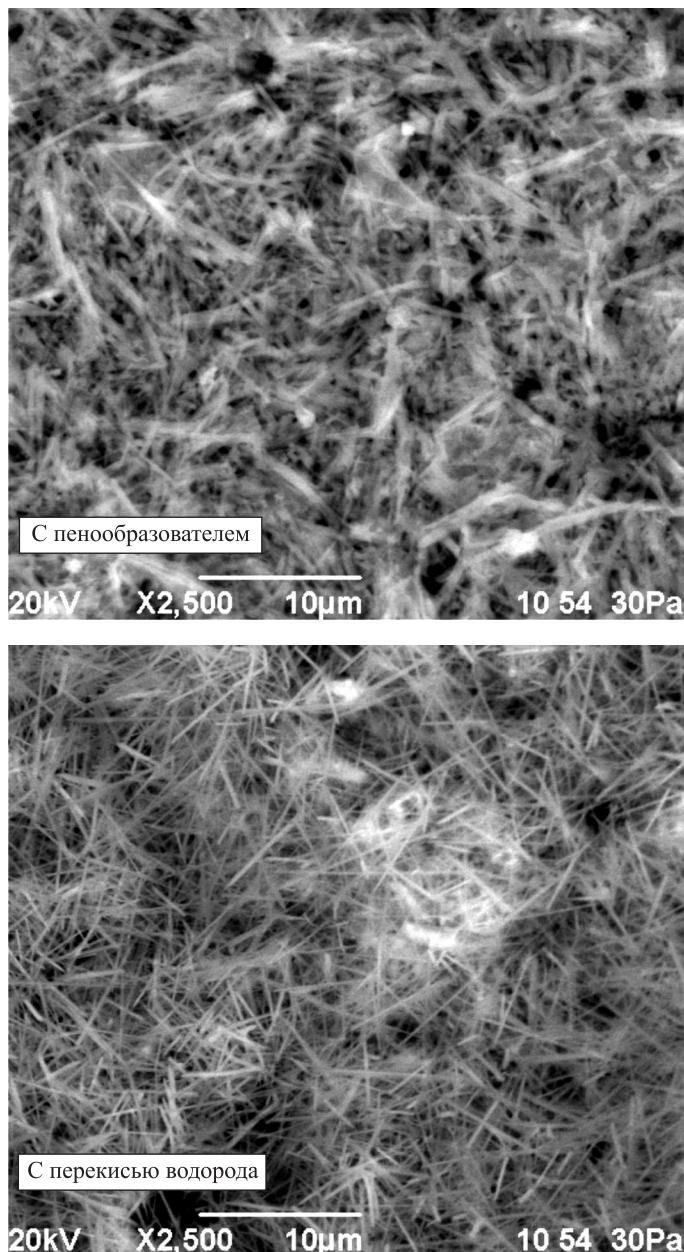


Рис. 3. Микроструктура камня магнезиальных ячеистых композитов на различных порообразователях

Принцип 1 – целенаправленный выбор сырьевых материалов, которые обеспечивают формирование пор, прочный каркас пористой структуры. Вязкопластичные свойства магнезиальной матрицы способствуют формированию высокопористого строения. Высокая активность каустического магнезита обеспечивает образование гидратов, упрочняющих структуру поризованного камня. Магнезиальные массы проявляют высокую адгезию к наполнителям.

Принцип 2 – рациональное использование техногенных материалов, которые являются носителями пор или способствуют формированию пористой структуры (зольная микросфера, некондиционные волокна, пенополистирол).

Принцип 3 – комплексная поризация материалов, предусматривающая сочетание различных механизмов формирования пор. Например, пенообразование благоприятствует равномерному распределению газовой фазы на следующем этапе поризации магнезиальных композиций.

Принцип 4 – создание комбинированных материалов по типу «структура в структуре». Пористость композитов определяют структуры разных уровней: матрица, содержащая полимодальные ячейки, объединяет пустотельные или поризованные зерна различных фракций. Тонкие волокна магнезиальных кристаллогидратов укрепляют структуру из ячеек и зерен.

Принцип 5 – первичный контакт компонентов формовочной массы. Предпочтительны способы приготовления формовочных масс, которые предусматривают первичный контакт компонентов, формирующих устойчивость матрицы композиционных материалов.

Принцип 6 – стимулирование поризации. Многокомпонентный состав формовочных смесей зачастую способствует замедлению химических реакций, препятствует своевременному протеканию процессов поризации. Поризацию стимулируют технологические приемы: повышение дисперсности компонентов; регулирование pH среды; изменение концентрации солевого раствора; рациональный порядок смещивания составляющих; оптимизация реологических свойств и интенсификация перемешивания формовочной массы.

Принцип 7 – стабилизация высокопористого строения. Высокопористая структура композиционных материалов характеризуется уменьшением доли матрицы, тонкими стенками ячеек, сокращением контактов между наполнителями. Это способно снизить устойчивость пористой структуры. Для стабилизации высокопористого строения необходим баланс скоростей процессов поризации и структурообразования массы. Например, для поризованных магнезиальных композиций целесообразна интенсификация гидратации вяжущего, оптимизация приготовления формовочной массы.

Выводы. Магнезиальные композиции обеспечивают возможности для совмещения различных способов поризации. Комбинированные ячеисто-зернистые структуры магнезиальных материалов характеризуются наибольшей стабильностью и высокой пористостью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Сахаров Г.П. Развитие производства и повышение конструктивных свойств автоклавного ячеистого бетона и изделий на его основе // Технологии бетонов. 2012. № 11–12. С. 56–58.

2. 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.
3. Mugahed Y.H., Farzadnia A.N., Ali A.A.A. Properties and applications of foamed concrete // Construction and Building Materials. 2015. No. 30. P. 990–1005.
4. Hilal A.A., Thom N.H., Dawson A.R. On void structure and strength of foamed concrete made without/with additives // Construction and Building Materials. 2015. No. 85. P. 157–164.
5. Королев А.С., Волошин Е.А., Трофимов Б.Я. Повышение прочностных и теплоизоляционных свойств ячеистого бетона путем направленного формирования вариатропной структуры // Строит. материалы. 2005. № 5. С. 8–10.
6. Дерябин П.Е., Дерябин П.П. Влияние рецептурно-технологических факторов на реологические свойства пеногазобетонной смеси // Изв. вузов. Строительство. 2006. № 1. С. 32–35.
7. Строкова В.В., Бухало А.Б. Пеногазобетон на нанокристаллическом порообразователе // Строит. материалы. 2008. № 1. С. 38–39.
8. Тюкавкина В.В., Касиков А.Г., Гуревич Б.И., Семушкин В.В. Продукты гидратации магнезиального цемента, модифицированного добавкой аморфного кремнезема // Техника и технология силикатов. 2015. № 1. С. 6–11.
9. Зырянова В.Н., Бердов Г.И., Верещагин В.И. Физико-химические процессы и технология получения композиционных магнезиальных вяжущих материалов с использованием магнийсиликатных наполнителей // Техника и технология силикатов. 2010. № 1. С. 15–23.
10. Yunsong J. A new type of light magnesium cement foamed material // Materials Letters. 2002. No. 56. P. 353–356.
11. Miruk O. Development of cellular structure composites for energy efficient construction // Energy Procedia. 2017. Vol. 128. P. 469–476.

Мирюк Ольга Александровна, д-р техн. наук, проф.

Рудненский индустриальный институт, Казахстан

Получено 31.10.17

Miryuk Olga Aleksandrovna, DSc, Professor

Rudny Industrial Institute, Kazakhstan

ON THE FORMATION OF THE HIGHLY POROUS STRUCTURE OF MAGNESIUM COMPOSITE MATERIALS

The possibility of creating highly porous materials based on caustic magnesite is considered. The results of experimental studies of methods for the porosity of magnesium compositions are presented. The influence of technogenic fillers on the formation of the porous structure of magnesium materials is determined. Technological solutions aimed at intensifying hardening of magnesium foam concrete are proposed. The advantage of the combined cellular-granular structures magnesium materials formed in combination foam mixture with porous granules is shown. The results of studies of the structure and properties of porous magnesium materials are presented. The principles of creating highly porous magnesium compositions are formulated.

К e y w o r d s: porosity, cellular concrete, combined structure, magnesia materials.

REFERENCES

1. S a k h a r o v G.P. Razvitie proizvodstva i povyshenie konstruktivnykh svoystv avtoklavnogo yacheistogo betona i izdeliy na ego osnove [Development of production and improvement of constructive properties of autoclaved cellular concrete and products based on it]. Tekhnologii betonov [Concrete Technology]. 2012. No. 11–12. Pp. 56–58. (in Russian)
2. L o g a n i n a V.I., F r o l o v M.V. Jeffektivnost' primeneniya teploizolyatsionnoy shtukaturki s primeneniem mikrosfer dlya otdelki gazobetonnoy ogranichayushchey konstruktsii [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)
3. M u g a h e d Y.H., F a r z a d n i a A.N., A l i A.A.A. Properties and applications of foamed concrete. Construction and Building Materials. 2015. No. 30. Pp. 990–1005.
4. H i l a l A.A., T h o m N.H., D a w s o n A.R. On void structure and strength of foamed concrete made without/with additives. Construction and Building Materials. 2015. No. 85. Pp. 157–164.
5. K o r o l e v A.S., V o l o s h i n E.A., T r o f i m o v B.Ya. Povyshenie prochnostnykh i teploizolyatsionnykh svoystv yacheistogo betona putem napravленного формирования вариатропной структуры [Increase of strength and heat insulation properties of cellular concrete by directed formation of a variational structure]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2005. No. 5. Pp. 8–10. (in Russian)
6. D e r y a b i n P.E., D e r y a b i n P.P. Vliyanie retsepturno-tehnologicheskikh faktorov na reologicheskie svoystva penogazobetonnoy smesi [Effect of prescription and technological factors on the rheological properties of a foam gas-concrete mixture]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2006. No. 1. Pp. 32–35. (in Russian)
7. S t r o k o v a V.V., B u k h a l o A.B. Penogazobeton na nanokristallicheskom poroobrazovatele [Foam gas-concrete on a nanocrystalline blowing agent]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2008. No. 1. Pp. 38–39. (in Russian)
8. T y u k a v k i n a V.V., K a s i k o v A.G., G u r e v i c h B.I., S e m u s h i n V.V. Produkty hidratatsii magnezial'nogo tsementa, modifitsirovannogo dobavkoy amorffnogo kremnezema [Hydration products of magnesia cement modified by the addition of amorphous silica]. Tekhnika i tekhnologiya silikatov [Technique and technology of silicates]. 2015. No. 1. Pp. 6–11. (in Russian)
9. Z y r y a n o v a V.N., B e r d o v G.I., V e r e s h c h a g i n V.I. Fiziko-khimicheskie protsessy i tekhnologiya polucheniya kompozitsionnykh magnezial'nykh vyazhu-shchikh materialov s ispol'zovaniem magniysilikatnykh napolniteley [Physicochemical processes and technology for the preparation of composite magnesia astringents using magnesium silicate fillers]. Tekhnika i tekhnologiya silikatov [Technique and technology of silicates]. 2010. No. 1. Pp. 15–23. (in Russian)
10. Y u n s o n g J. A new type of light magnesium cement foamed material. Materials Letters. 2002. No. 56. Pp. 353–356.
11. M i r y u k O. Development of cellular structure composites for energy efficient construction. Energy Procedia. 2017. Vol. 128. Pp. 469–476.

УДК 691.55.002.3

О.А. ИГНАТОВА, Н.В. МАКАРОВА

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНОЙ ДОБАВКИ САЖЕВОГО ПИГМЕНТА НА СВОЙСТВА ГИПСОЦЕМЕНТНО-ПУЦЦОЛАНОВОГО ВЯЖУЩЕГО

В статье приведены результаты исследований по повышению прочности и водостойкости гипсовых материалов за счет комплексных гидравлических, пущцолановых и ультрадисперсных добавок. Разработаны составы вяжущих, состоящих из гипса 55–75, цемента 5–35, микрокремнезема 10–15, ультрадисперсной углеродной добавки 0,001–0,005 %. В качестве ультрадисперсной добавки использована сажа – универсальный пигментный концентрат. Средний размер частиц сажи составляет 150–180 нм. Добавка сажи способствует интенсификации процессов твердения гипсоцементно-пущцоланового вяжущего и приводит к формированию более однородной и тонкодисперсной фазовой структуры вяжущих. Применение добавки позволило улучшить механические показатели гипсоцементно-пущцоланового вяжущего на 58 % и повысить водостойкость на 30 % за счет уплотнения структуры композита. На основе водостойкого гипсоцементно-пущцоланового вяжущего разработаны составы легких бетонов и растворов на пористых заполнителях для стекловых изделий и легких штукатурок. Коэффициент теплопроводности легких бетонов и штукатурных составов на основе гипсоцементно-пущцоланового вяжущего составил 0,27–0,31 Вт/(м · °C), что соответствует требованиям для ограждающих конструкций.

Ключевые слова: повышение водостойкости, гипсоцементно-пущцолановое вяжущее, комплексная модификация, микрокремнезем, углеродная ультрадисперсная добавка, сажа.

Введение. Применение материалов на основе гипса ограничивается их недостаточной водостойкостью, которая сопровождается увеличением ползучести и значительным снижением прочности при увлажнении.

Для повышения водостойкости гипсовых изделий существуют следующие направления:

- уменьшение растворимости затвердевшего гипса;
- изменение капиллярно-пористой структуры гипсового камня с целью снижения водопоглощения и водопроницаемости;
- поверхностная гидрофобизация, препятствующая водонасыщению гипсовых изделий [1].

Первые два способа повышают водостойкость изделий по всему объему, и их надежность не зависит от случайных повреждений поверхности.

Для реализации этой задачи используются различные добавки, но наиболее эффективными являются те, которые позволяют одновременно снизить растворимость гипса и уменьшить водопроницаемость гипсового камня [2].

Известно [3], что гипсовые вяжущие в зависимости от величины коэффициента размягчения K_p делятся:

- на неводостойкие – $K_p < 0,45$;
- средней водостойкости – $0,45 < K_p < 0,6$;
- повышенной водостойкости – $0,6 < K_p < 0,8$;
- водостойкие – $K_p > 0,8$.

Постановка проблемы. Разработка эффективных гипсовых материалов невозможна без их модификации. Свойства гипсовых изделий (водостойкость, прочность и др.) определяются состоянием и структурой вяжущего. Различные добавки существенно влияют на протекание гидратации и формирование структуры минеральных вяжущих: изменяют размер и форму кристаллов, состояние межфазной поверхности, пористость и т.д.

В 60-х гг. XX в. были проведены эксперименты по получению прочных и водостойких гипсовых вяжущих с активными минеральными добавками, которые приводят к стабилизации системы гипс – цемент, но на тот момент эффект применения добавок оказался недостаточным. В связи с этим, исследованиями последних лет предложено повысить прочностные свойства и водостойкость гипсовых вяжущих введением современных комплексных гидравлических, пущцолановых добавок и ультрадисперсных частиц [4, 5].

В настоящее время интенсивно осваиваются технологии направленного регулирования структуры и свойств строительных материалов с применением углеродных наносистем. Добавки ультрадисперсных частиц обладают высокой поверхностной энергией и химической активностью и оказывают наиболее сильное влияние на формирование структуры минеральных вяжущих. Введение в состав гипсовых вяжущих дисперсий углеродных нанотрубок приводит к повышению прочностных показателей и формированию прочной, плотной структуры [6, 7]. Одним из факторов, сдерживающих применение углеродных нанотрубок в строительных материалах, является дороговизна, связанная с нерентабельностью производства, неразвитостью рынка и сложностью использования на практике.

Цель данной работы – повышение водостойкости, прочностных характеристик и структуры композиционного гипсового вяжущего углеродной добавкой в виде ультрадисперсных частиц промышленного производства. Улучшение структуры композитов на основе гипсоцементно-пущцоланового вяжущего (ГЦПВ) осуществлялось за счет введения сверхмалых концентраций техногенного отхода производства сажи.

Материалы и методы исследований. Композиционное вяжущее готовили из строительного гипса марок Г4-Г5 средней тонкости помола и портландцемента марки ЦЕМ I 42,5Б. Качественное содержание гипса и портландцемента варьировалось в интервале 55–75 и 5–35 % соответственно. В качестве пущцолановой добавки использовали техногенный продукт металлургии, получаемый при выплавке ферросилиция – микрокремнезем МК-85 производства компании «Кузнецкие ферросплавы», в количестве 10–15 %.

В качестве ультрадисперсных частиц была применена углеродсодержащая добавка в виде колеровочной пасты на водной основе – концентрат пигментный универсальный (сажа) UPC фирмы PALIZH (ТУ 2316-001-49630959-02). Вы-

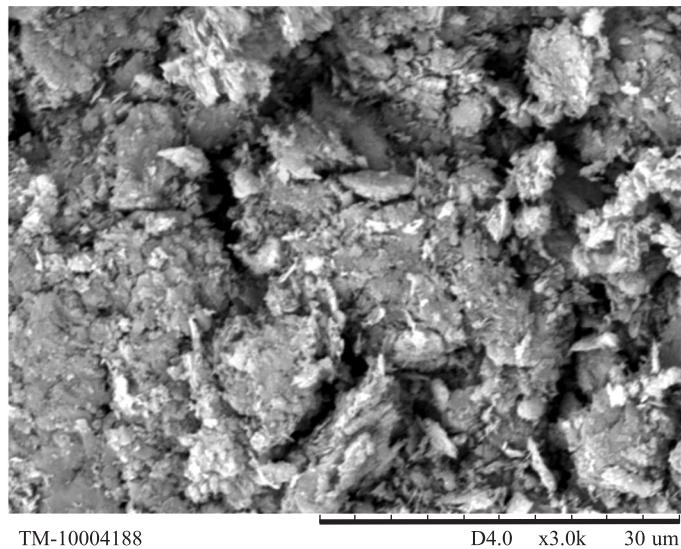


Рис. 1. Микрофотография сажевого пигмента

сушенный пигмент (рис. 1) представлен плотными скоплениями агрегированных частиц размером 5–15 мкм, что, вероятно, связано с использованием поверхностно-активных добавок в колеровочной пасте.

Анализ дисперсности сажевого пигмента с помощью лазерного анализатора частиц HORIBA LA-950 показал, что размер неагрегированных частиц варьируется в пределах от 130 до 250 нм, а средний размер составляет 150–180 нм (рис. 2).

Сажевый пигмент вводился в количестве 0,001–0,005 % по сухой массе от массы вяжущего. Данная добавка не является дорогостоящей и дефицитной, процесс приготовления композиционного вяжущего не требует специ-

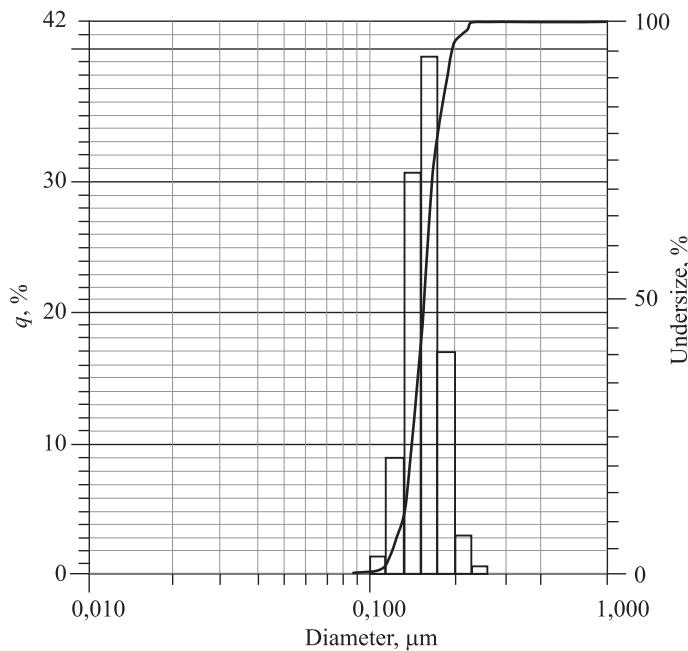


Рис. 2. Распределение частиц пигмента (сажи) по размерам

Таблица 1. Состав и свойства ГЦПВ

Состав, №	Состав вяжущих, %					Прочность при сжатии, 28 сут, МПа		$K_p = \frac{R_{\text{нас}}}{R_{\text{сух}}}$
	Г	ПЦ	МК	ПД	сажа	сухой	водонасыщенный	
1	100	—	—	—	—	4,7	1,6	0,34
2	65	25	10	—	—	10,4	6,7	0,65
3	65	25	10	0,3	0,004	16,4	13,9	0,85

П р и м е ч а н и е. Г – гипс, ПЦ – портландцемент, МК – микрокремнезем, ПД – пластифицирующая добавка.

альных технологий, так как вододисперсный пигмент добавляется в воду затворения и легко распределяется в композиции. Кроме минеральных добавок использовали пластифицирующую добавку Melment F10 в количестве от 0,1 до 0,5 % от массы вяжущего. Оптимальный расход пластификатора составил 0,3 %.

Для изучения влияния добавки на прочностные свойства вяжущего изготавливали стандартные образцы размером 4×4×16 см. Водовяжущее отношение подбиралось по нормальной густоте теста в пределах 170–190 мм. Гипсовые образцы, модифицированные цементом, микрокремнеземом и сажей, выдерживали при нормальных условиях с последующим проведением механических испытаний в возрасте 28 сут.

Предварительно исследовали влияние добавки сажи на прочность гипсового вяжущего без добавок. Было установлено, что введение сажи в состав гипса не влияет на его прочностные характеристики.

Введение углеродной ультрадисперсной добавки сажи в количестве 0,004 % от массы композиционного вяжущего (гипс-цемент-микрокремнезем) позволило добиться увеличения прочности на 58 % и повысить коэффициент размягчения (K_p) на 30 % (табл. 1 и рис. 3) по сравнению с вяжущим без добавки, таким образом, получить водостойкое гипсоцементно-пуццолановое вяжущее.

В работе был выполнен рентгенофазовый анализ композиционных вяжущих (рис. 4). Из результатов анализа следует, что интенсивности рефлексов $d = 7,56; 4,29; 3,07; 2,87; 2,67 \text{ \AA}$ соответствуют $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; $d = 3,03; 2,7–2,8; 1,78–1,89 \text{ \AA}$ – гидросиликатам кальция различного вида; $d = 6,3–6,4; 3,36–3,15; 2,85 \text{ \AA}$ – гиролиту. Анализ дифрактограмм показывает, что при введении добавок микрокремнезема (рис. 4, б); микрокремнезема и ультрадисперсной сажи (рис. 4, в) не появляется новых рефлексов, но возрастают интенсивности рефлексов

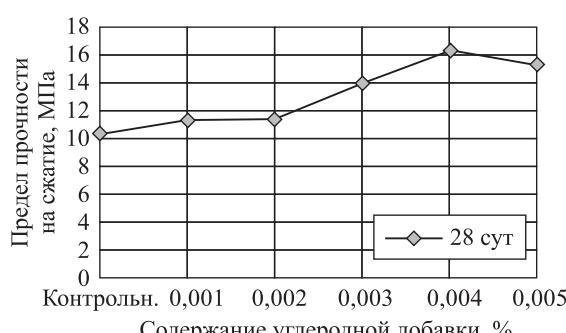


Рис. 3. Влияние углеродной добавки на прочность ГЦПВ

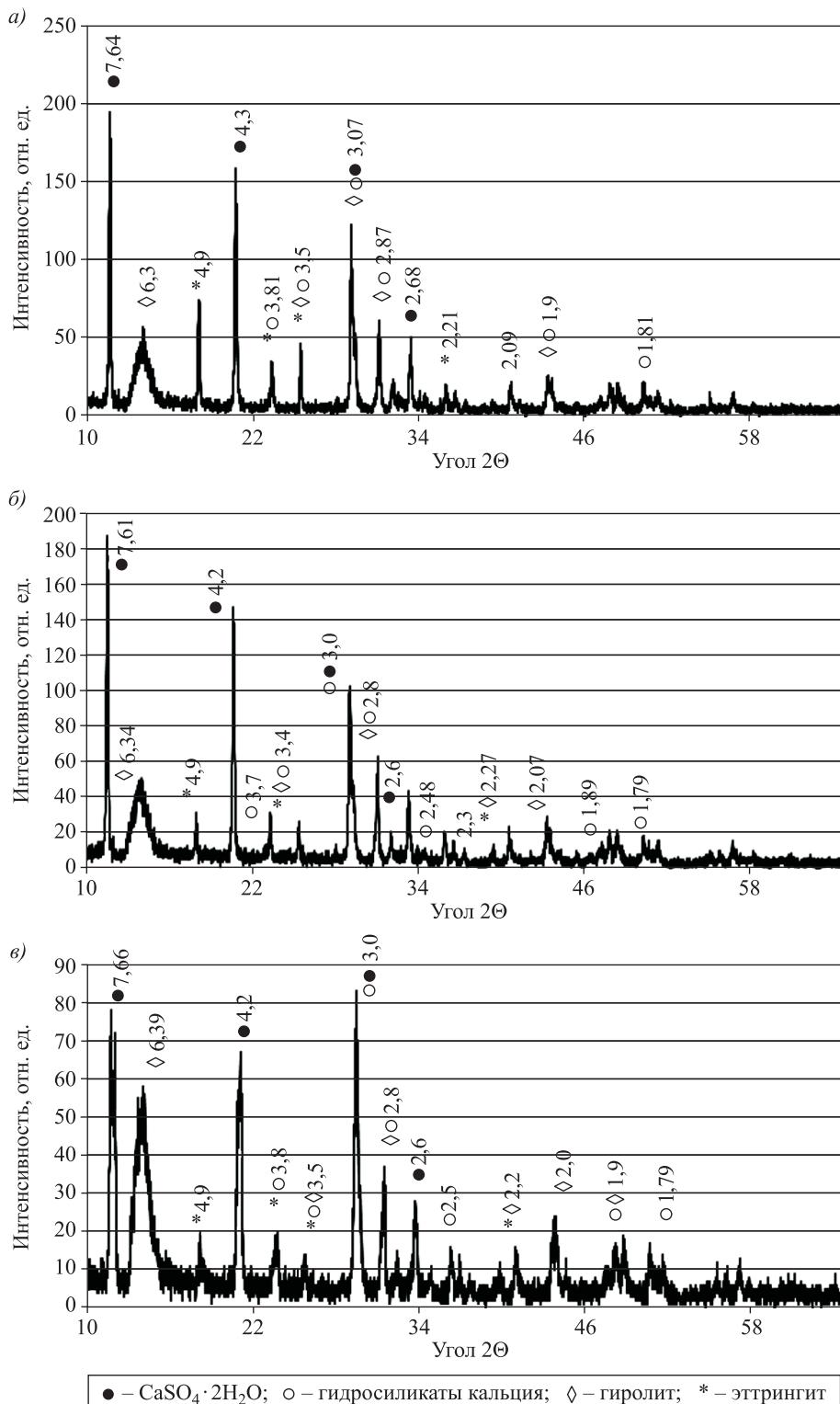
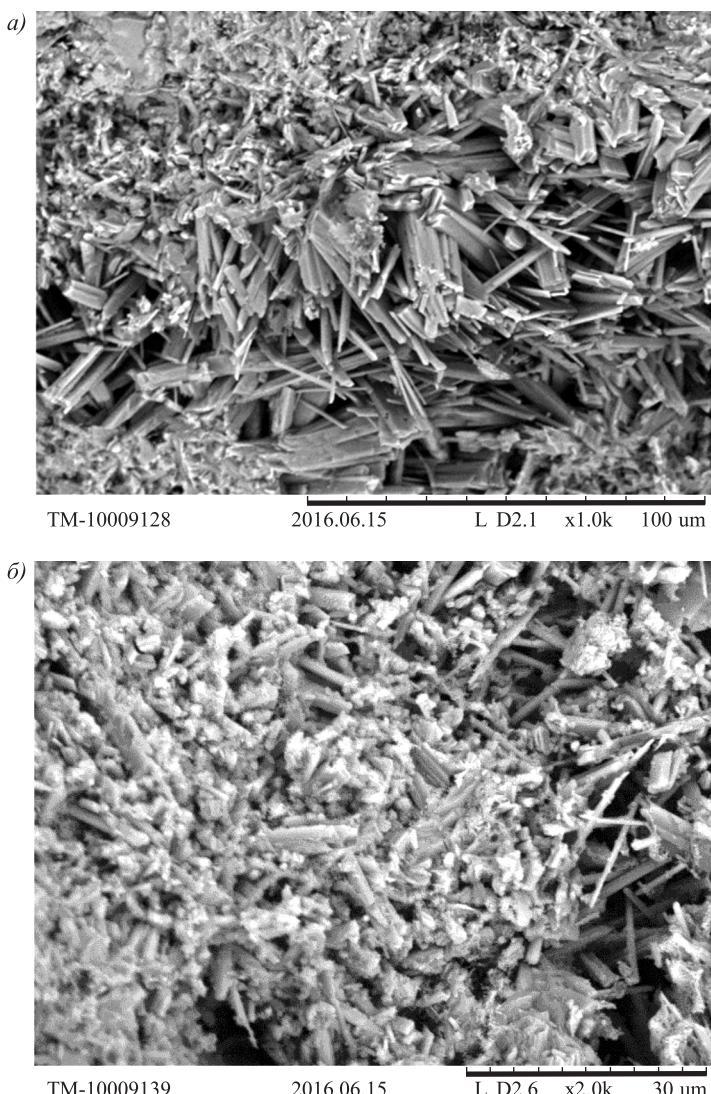


Рис. 4. Дифрактограммы затвердевшего вяжущего

а – гипсоцементный камень (гипс + цемент); *б* – гипсоцементно-пуццолановый (гипс + цемент + + микрокремнезем); *в* – гипсоцементно-пуццолановое вяжущее с добавкой сажи

новообразований, т.е. добавление микрокремнезема и сажевого пигмента увеличивает количество и разнообразие гидросиликатов кальция. Можно предположить, что повышение водостойкости ГЦПВ обусловлено связыванием свободного гидроксида кальция микрокремнеземом, а углеродная добавка, являясь центром кристаллизации, способствует образованию большего количества низкоосновных гидросиликатов кальция, которые предотвращают формирование этtringита.

Анализ снимков микроструктуры контрольного гипсоцементно-пущоланового и модифицированного сажей вяжущих, приведенных на рис. 5, показал уплотнение структуры в последнем образце за счет формирования более плотной упаковки кристаллов двуводного гипса и низкоосновных гидросиликатов кальция.



*Рис. 5. Микроструктура гипсоцементно-пущоланового вяжущего
а – контрольный образец; б – с углеродной добавкой*

Таким образом, углеродная ультрадисперсная добавка, возможно, играет роль центров кристаллизации, изменяя направление и скорость физико-химических процессов в твердеющем гипсоцементно-пушцолановом вяжущем. В результате комплексной модификации строительного гипса получено водостойкое (коэффициент размягчения более 0,8) гипсоцементно-пушцолановое вяжущее ГЦПВ марки 150.

На основе водостойкого гипсоцементно-пушцоланового вяжущего с добавкой ультрадисперсной сажи (состав № 3, табл. 1) разработаны составы легких мелкозернистых бетонов на пористых заполнителях. В качестве заполнителей использовали керамзитовый песок фракций 2,5–5 мм и перлитовый песок фракций 0,315–2,5 мм. Составы бетонов и результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2. Составы и результаты испытаний мелкозернистых гипсобетонов, кг/м³

Состав, №	ГЦПВ	Заполнитель		Вода	Плотность, кг/м ³	<i>R_{сж}</i> 28 сут, МПа		<i>K_p</i>	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °C)
		керамзит	перлит			сухое состояние	водо-насыщенное		
1	720	460	–	460	1290	9,8	–	–	–
2	500	510	–	425	1090	4,5	–	–	–
3	600	475	–	425	1160	7,8	5,8	0,74	0,31
4	500	–	240	488	820	1,5	–	–	–
5	600	–	220	500	920	2,7	1,9	0,70	0,27
6	700	–	220	525	1050	3,9	–	–	–

Состав № 3 на основе керамзитового песка соответствует требованиям для стеновых камней, плит и перегородок (Рекомендации по проектированию, изготовлению и применению изделий и конструкций из бетона на гипсоцементно-пушцолановых вяжущих. М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1989). Состав № 5 (на основе перлитового песка) может быть использован для теплых штукатурок [8]. Полученные результаты позволяют отнести изделия на основе гипсоцементно-пушцолановых вяжущих, модифицированных сажей, к группе повышенной водостойкости ($0,6 < K_p < 0,8$).

Микроструктура ГЦПВ, наполненного перлитом, представлена на рис. 6. На микрофотографии четко просматриваются фрагменты гранул перлита с точечными зонами взаимодействия поверхности наполнителя с кристаллами вяжущей матрицы. Дефекты гранул перлита (трещины, сколы) обусловливают сравнительно невысокую прочность изделий. Однако достигнутая средняя плотность при использовании в качестве заполнителя перлита удовлетворяет требованиям, предъявляемым к теплым штукатурным материалам.

Микрофотографии затвердевшего ГЦПВ, наполненного керамзитом, показывают плотный контакт вяжущего и заполнителя (рис. 7), что приводит к повышению прочности легкого бетона.

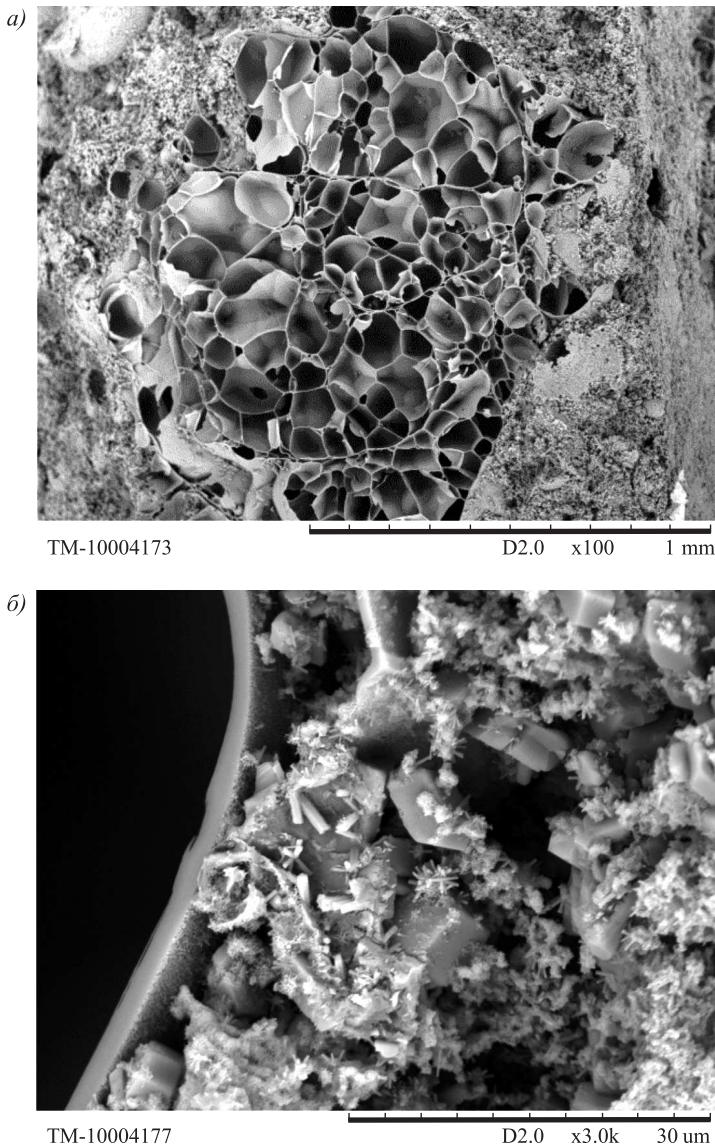


Рис. 6. Микроструктура композита, наполненного перлитовым песком
а – общий вид; б – контактная зона ГЦПВ – перлит

Таким образом, введение углеродной ультрадисперсной добавки в состав гипсоцементно-пуццоланового вяжущего позволило улучшить его механические показатели и повысить водостойкость за счет уплотнения структуры композита [9].

Заключение. В работе показано, что введение ультрадисперсной углеродной добавки в состав ГЦПВ способствует интенсификации процессов твердения и приводит к формированию более однородной и тонкодисперсной фазовой структуры вяжущих. Данные результаты достигаются благодаря формированию более плотной поровой структуры материалов с гипсоцементно-пуццолановым вяжущим, модифицированным ультрадисперсными частицами сажи.

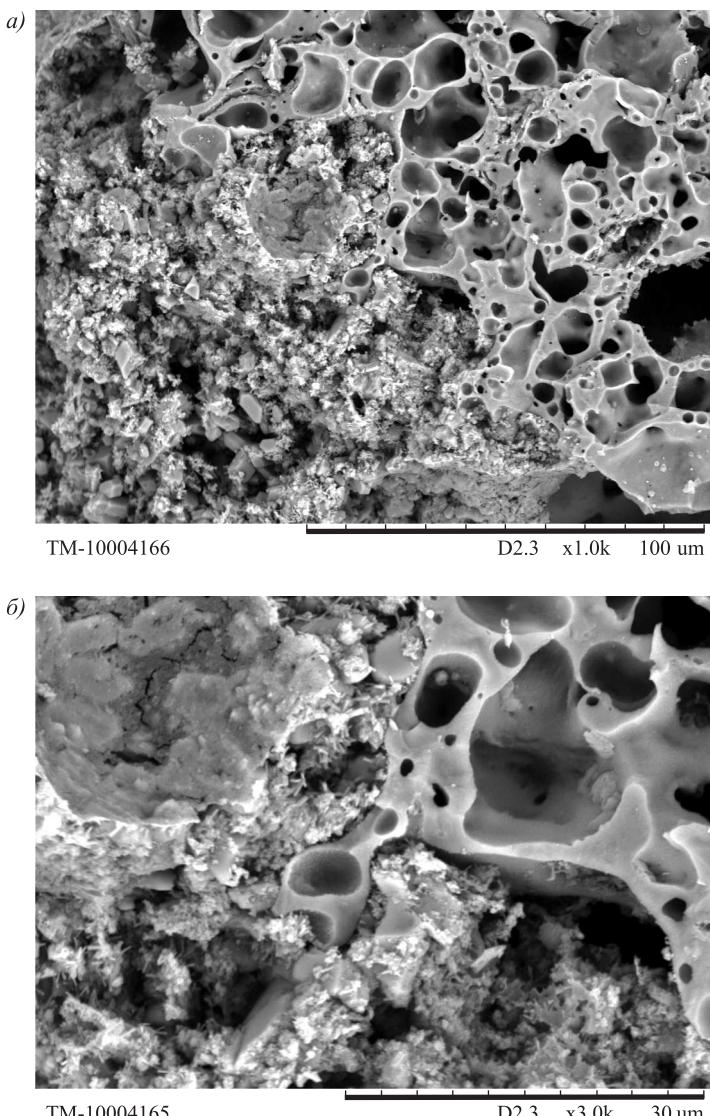


Рис. 7. Микроструктура композита, наполненного керамзитовым песком
а – общий вид; б – контактная зона ГЦПВ – керамзит

Результаты физико-механических испытаний бетонов на основе разработанного вяжущего, керамзитового и перлитового песка позволяют сделать вывод, что уровень полученных показателей соответствует требованиям для стеновых изделий и теплых штукатурных составов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волженский А.В., Стамбулко В.И., Ферронская А.В. Гипсоцементно-пушцолановые вяжущие, бетоны и изделия. М.: Стройиздат, 1971. 318 с.
2. Ферронская А.В. Долговечность гипсовых материалов, изделий и конструкций. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.
3. Ферронская А.В. Гипсовые материалы и изделия. Производство и применение. М.: Изд-во АСВ, 2004. 451 с.

4. Изотов В.С., Музаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р. Комплексная добавка для повышения эффективности гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Стройт. материалы. 2016. № 8. С. 70–73.
5. Козлов Н.В., Панченко А.И., Бурьянов А.Ф., Соловьев В.Г. Микроструктура гипсового вяжущего повышенной водостойкости // Стройт. материалы. 2014. № 5. С. 72–75.
6. Гордина А.Ф., Токарев Ю.В., Яковлев Г.И., Керене Я., Спудулис Э. Различия в формировании структуры гипсового вяжущего, модифицированного углеродными нанотрубками и известью // Стройт. материалы. 2013. № 2. С. 34–38.
7. Музаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р. Влияние углеродных нанотрубок в составе поликарбоксилатного пластификатора на основные свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Сухие строит. смеси. 2017. № 1. С. 26–29.
8. Хрушкова Н.В., Плеханова Т.А., Игнатова О.А. Композиционное гипсовое вяжущее с углеродными добавками // Ресурсы и ресурсосберегающие технологии в строительном материаловедении: Междунар. сб. науч. тр. / НГАУ, ТГАСУ, РАЕ, РАПК. Новосибирск, 2016. С. 69–73.
9. Игнатова О.А., Макарова Н.В. Получение водостойкого композиционного гипсового вяжущего // Сборник докладов IX Международной научно-практической конференции «КНАУФ в мировом строительном комплексе». Челябинск, 2016. С. 78–82.

INFLUENCE OF ULTRADISPERSED ADDITIVE CARBON PIGMENT ON THE PROPERTIES OF GYPSUM-CEMENT-POZZOLAN BINDING

The results of researches on increase of durability and water resistance of gypsum materials due to complex hydraulic, pozzolanic and ultradispersed additives are resulted in the article. The compositions of astringents consisting of gypsum 55–75, cement 5–35, microsilica 10–15, ultrafine carbon additive 0,001–0,005 % have been developed. As the ultradisperse additive, soot is used – universal pigment concentrate. The average particle size of the carbon black is 170 nm.

The addition of soot contributes to the intensification of hardening processes of gypsum cement-pozzolanic binder (GCPB) and leads to the formation of a more homogeneous and finely dispersed phase structure of binders. The using of the additive allowed to improve mechanical parameters of gypsum cement-pozzolanic binder by 58 % and to increase water resistance by 30 % due to compaction of the composite structure. Based on waterproof gypsum cement-pozzolanic binder, the compositions of lightweight concrete and mortar on porous aggregates for wall products and light plasters have been developed. The coefficient of thermal conductivity of lightweight concrete and plaster compositions on the basis of GCPB was 0,27–0,31 W/(m · °C), which meets the requirements for enclosing structures.

К e y w o r d s: increasing water resistance, gypsum cement-pozzolan binder, complex modification, microsilica, carbon ultradisperse additive, soot.

Игнатова Ольга Арнольдовна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: oa_ignatova@mail.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
Макарова Наталья Викторовна, магистр; E-mail: khrushkova93@mail.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 23.10.17

Ignatova Olga Arnoldovna, PhD, Ass. Professor; E-mail: oa_ignatova@mail.ru
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Makarova Natalya Viktorovna, MSc; E-mail: khrushkova93@mail.ru
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

REFERENCES

1. Volzhenskiy A.V., Stambulko V.I., Ferronskaya A.V. Gipsotsementno-putstsolanovye vyazhushchie, betony i izdeliya [Gypsum-cement-pozzolanic binder, concrete and products]. Moscow, Stroyizdat, 1971. 318 p. (in Russian)
2. Ferronskaya A.V. Dolgoechnost' gipsovykh materialov, izdeliy i konstruktsiy [Durability of gypsum materials, products and designs]. Moscow, Stroyizdat, 1984. 256 p. (in Russian)
3. Ferronskaya A.V. Gipsovye materialy i izdeliya. Proizvodstvo i primenie [Gypsum materials and products. The production and use]. Moscow, 2004. 451 p. (in Russian)
4. Izotov V.S., Muzametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R. Kompleksnaya dobavka dlya povysheniya effektivnosti gipsotsementno-putstsolanovogo vyazhushchego [Complex additive to improve the efficiency of gypsum cement gypsum-pozzolanic binder]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2016. No. 8. Pp. 70–73. (in Russian)
5. Kozlov N.V., Panchenko A.I., Bur'yakov A.F., Solov'yev V.G. Mikrostruktura gipsovogo vyazhushchego povyshennoy vodostoykosti [Microstructure of the gypsum binder with the water-resistant]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2014. No. 5. Pp. 72–75. (in Russian)
6. Gordina A.F., Tokarev Yu.V., Yakovlev G.I., Kerene Ya., Spudulis E. Razlichiya v formirovaniy struktury gipsovogo vyazhushchego, modifitsirovannogo uglerodnymi nanotrubkami i izvest'yu [Distinctions in formation of structure the gypsum binder , modified by carbon nanotubes and lime]. Stroitel'nye materialy [Construction materials]. 2013. No. 2. Pp. 34–38. (in Russian)
7. Muzametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R. Vliyanie uglerodnykh nanotrubok v sostave polikarboksilatnogo plastifikatora na osnovnye svoystva gipsotsementno-putstsolanovogo vyazhushchego [Effect of carbon nanotubes in the composition of the polycarboxylate plasticizer on the basic properties of gypsum-pozzolanic binder]. Sukhie stroitel'nye smesi [Dry mixes]. 2017. No. 1. Pp. 26–29. (in Russian)
8. Khrushkova N.V., Plekhanova T.A., Ignatova O.A. Kompozitsionnoe gipsovoe vyazhushchee s uglerodnymi dobavkami [Composite gypsum binder with additives of carbon]. Resursy i resursosberegayushchie tekhnologii v stroitel'nom materialovedenii [Resources-saving technologies construction materials, International collection of scientific papers]. Novosibirsk, 2016. Pp. 69–73. (in Russian)
9. Ignatova O.A., Makarova N.V. Poluchenie vodostoykogo kompozitsionnogo gipsovogo vyazhushchego [Production of water-resistant composite gypsum binder]. Sbornik dokladov IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "KNAUF v mirovom stroitel'nom komplekse" [Compilation of reports of the IX International scientific-practical conference "KNAUF in the global construction industry"]. Chelyabinsk, 2016. Pp. 78–82. (in Russian)

УДК 691.11:674.048.5

А.П. ПИЧУГИН, М.О. БАТИН, А.Ю. КУДРЯШОВ, К.А. НИКИТЕНКО

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОЛИМЕРНЫМИ КОМПОЗИЦИЯМИ С НАНОДОБАВКАМИ

Приведены результаты получения и изучения модифицированной полимерными композициями древесины, которая обладает улучшенными эксплуатационными свойствами за счет комплексной совместной работы полимерной составляющей в массиве. Положительные результаты отмечены при введении в полимерную пропитывающую композицию наноразмерных добавок, обеспечивающих не только повышение физико-механических свойств и биостойкости, но и способствующих связыванию свободных фенолов и формальдегида, что важно при использовании модифицированной древесины в полах животноводческих помещений.

Ключевые слова: модифицированная древесина, биостойкость, адсорбционная способность, фенолоспирт, наноразмерные добавки, водные дисперсии, кремнезоль, углеродные нанотрубки.

Авторами разработаны и внедрены прогрессивные методы модификации древесины полимерными составами, что обеспечивает значительное уменьшение межремонтных периодов, сокращает трудовые, материальные и энергетические затраты, обеспечивает высокий эффект за счет возможности сохранения деревянных полов сельскохозяйственных зданий. Предложены методы качественного улучшения модифицирующих полимерных составов путем введения наноразмерных добавок, способствующих увеличению долговечности и надежности деревянных элементов решетчатых полов животноводческих объектов. Отработана рациональная рецептура модифицирующих композиций и технологические режимы проведения модификации древесины, обеспечивающие приздание фунгицидных свойств полам и снижение свободного фенола в материале [1–3].

В результате модификации древесина березы приобретает улучшенные свойства, превосходящие показатели хвойных пород, а степень повышения эксплуатационных свойств зависит от следующих рецептурно-технологических факторов: типа модификатора и вида специальных улучшающих добавок, режима пропитки, температуры и способа отверждения и др. Благодаря многофакторности управления свойствами древесины при модификации, можно получать материал с заданной прочностью, водостойкостью и биостойкостью. Таким образом, модификация древесины создает условия для комплексного улучшения всех технологических и эксплуатационных показателей [2–7].

При модификации древесины фенолоспиртом с добавками направленного действия, какими являются наноразмерные водные дисперсии кремнезоля и углеродных нанотрубок, можно получить совершенно уникальный

материал. Обладая высокой полярностью, молекулы фенолоспиртов легко проникают в стенки клеток, вызывают утолщение вторичных оболочек и способствуют созданию защитной пленки на внутренней поверхности сосудов и капилляров. При этом отмечается некоторое увеличение линейных размеров образцов или заготовок, представляющее собой остаточное набухание модифицируемой древесины, что достаточно полно было рассмотрено в предыдущих работах [3, 8, 9]. Дополнительным положительным эффектом модификации древесины является изменение адсорбционной способности материала древесины, что видно на рис. 1 для образцов березы.

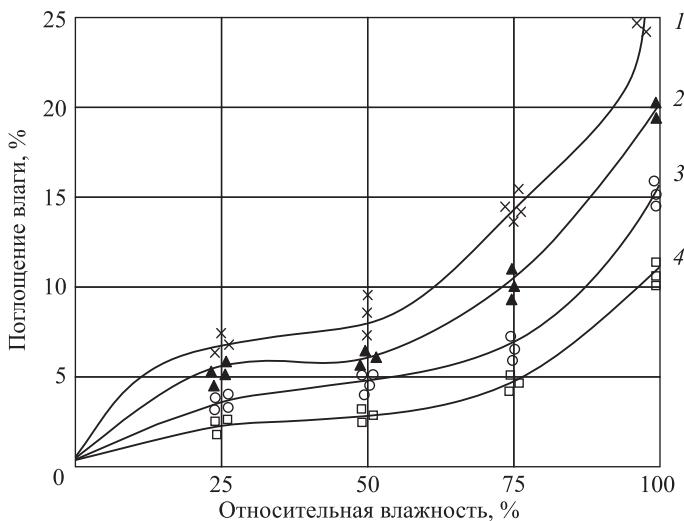


Рис. 1. Кривые адсорбционной способности модифицированной древесины березы

1 – натуральная древесина; 2 – модифицированная фенолоспиртом; 3 – то же, с добавкой КЗ; 4 – то же, с добавкой КЗ и УНТ

Показано, что введение наноразмерных добавок способствует уменьшению количества поглощаемой влаги, причем совместное введение малых доз кремнезоля (КЗ) и углеродных нанотрубок (УНТ) способствует резкому снижению адсорбции влаги в широком диапазоне относительной влажности. Отмеченный эффект сопровождается повышением физико-механических характеристик модифицированной древесины, что проиллюстрировано на рис. 2.

Степень насыщения древесины, модифицируемой композицией с наноразмерными добавками, оказывает существенное влияние на величину мгновенного модуля упругости как при статическом изгибе, так и при сжатии [7, 10–16]. Следовательно, при модификации древесины для полов животноводческих помещений необходимо стремиться не достигать максимального насыщения, а ограничивать степень насыщения минимально достаточной величиной с минимальным расходом наноразмерных компонентов.

Воздействие агрессивных сред животноводческих помещений, особенно при повышенных температурах, способствует более интенсивному про-

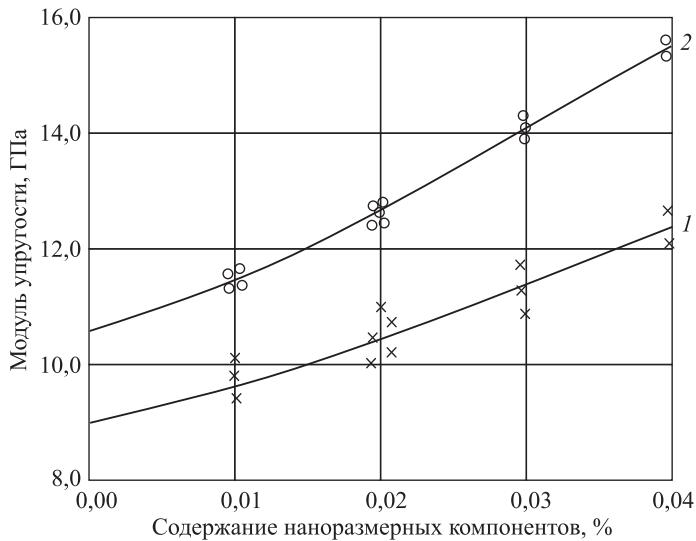


Рис. 2. Влияние степени насыщения древесины березы, модифицируемой композицией, на величину мгновенного модуля упругости

1 – при статическом изгибе; 2 – при сжатии

цессу разрушения древесины (рис. 3) [10–16]. Поэтому были проведены серии испытаний по потере прочности в экстремальных условиях: при воздействии различных концентраций серной кислоты в обычных условиях и при нагревании, при нахождении в синтетическом растворе мочи сельскохозяйственных животных, при длительном воздействии агрессивных сред и т.д. [8, 10–14].

Анализ вышеприведенных графиков позволяет сделать следующее заключение о стойкости модифицированной древесины и ее способности сопротивляться агрессивным средам животноводческих помещений. Так, при

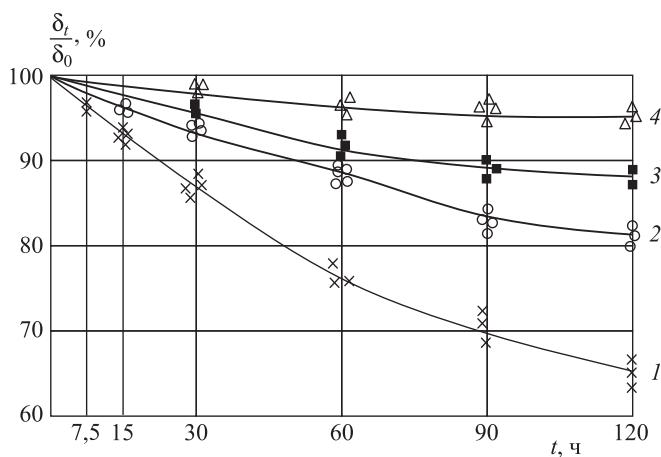


Рис. 3. Потеря прочности модифицированной древесины при нагревании в агрессивных средах

*1 – обработка фенолоспиртом; 2 – фенолоспирт + КЗ;
3 – фенолоспирт + УНТ; 4 – то же + КЗ + УНТ*

нахождении в синтетическом растворе мочи сельскохозяйственных животных, при нагревании и длительном воздействии агрессивных сред отмечено положительное влияние модификации древесины на способность сопротивляться разрушающим факторам. В то же время при введении кремнезоля в количестве от 10 до 15 % в состав пропитывающей композиции повышается относительная прочность при длительном воздействии. Еще большее упрочняющее влияние на свойства модифицированной древесины в условиях агрессивного воздействия сред животноводческих помещений оказывает введение незначительного количества углеродных нанотрубок, но самый большой эффект проявляется при комплексном введении в пропитывающий раствор водных дисперсий КЗ с УНТ. За 120 ч нахождения в паровоздушной концентрированной среде такая древесина снизила свои показатели менее чем на 5 % (см. рис. 3).

Кроме того, производилось испытание древесины на коррозионную стойкость в условиях воздействия концентрированной серной кислоты. Известно, что обычная натуральная древесина при таком воздействии разрушается в течение нескольких минут. Для древесины, модифицированной фенолоспиртом с добавками направленного действия в виде наноразмерных водных дисперсий кремнезоля и углеродных нанотрубок, этот процесс длится в течение нескольких часов. Даже в условиях нахождения образцов в высококонцентрированной серной кислоте сопротивляемость материала составляла несколько часов без значительной потери прочности и формы. При этом наблюдалось лишь почернение наружной поверхности испытываемых образцов и некоторое уменьшение их объема [2, 8].

Длительное воздействие сероводородных ванн, углекислотных и аммиачных сред, а также синтетического раствора мочи сельскохозяйственных животных [10–13] на образцы модифицированной древесины показало, что интегральная величина потери прочности по всем видам воздействий для натуральной древесины снижает прочность в течение 3–4 мес на 20–25 %. При модификации фенолоспиртом древесина устойчива в течение 9–12 мес без существенного снижения прочности и формоустойчивости. Для образцов древесины, модифицированных фенолоспиртом с добавками направленного действия в виде наноразмерных водных дисперсий кремнезоля и углеродных нанотрубок, только в начальной стадии пребывания в агрессивных средах наблюдается незначительное снижение физико-механических характеристик, которое далее стабилизируется и в течение длительного срока практически остается неизменным (рис. 4).

Аналогичный эффект наблюдается и при изучении изменения массы образцов, подвергшихся воздействию агрессивных сред в лабораторных и натурных условиях действующего животноводческого предприятия. Как следует из приведенных кривых, модифицированная древесина способствует резкому уменьшению потери массы, особенно для составов с наноразмерными добавками. Это хорошо согласуется с аналогичными результатами по определению прочности и других физико-механических свойств образцов из модифицированной древесины при воздействии агрессивных сред животноводческих помещений [2, 3, 9].

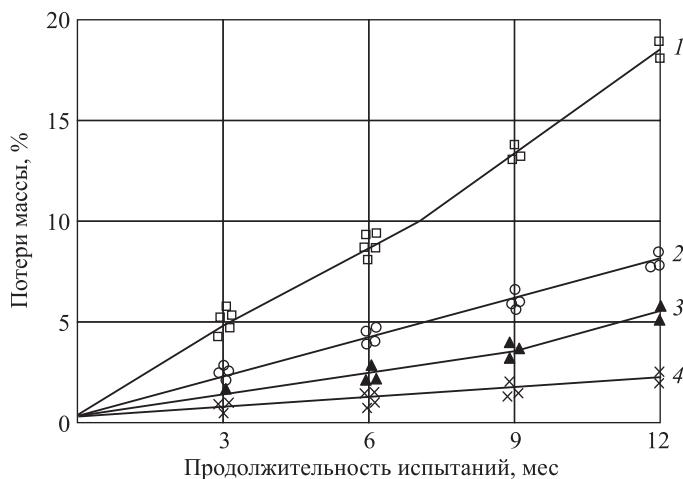


Рис. 4. Изменение свойств модифицированной древесины при эксплуатации в коровнике

1 – натуральная древесина; 2 – фенолоспирт; 3 – фенолоспирт + КЗ; 4 – то же + УНТ

Древесина, модифицированная фенолоспиртом с добавками направленного действия в виде наноразмерных водных дисперсий кремнезоля и углеродных нанотрубок, обладая большей формостабильностью и высокой водостойкостью, приобретенной в ходе пропитки изделий, имеет хорошую сопротивляемость к воздействию агрессивных сред. Увеличение прочности древесины даже при сравнительно небольшом (20–30 %) содержании фенолоспиртов обусловлено высокой прочностью отверженных фенолоформальдегидных полимеров, а также глубоким прониканием полимера в клеточные стенки.

В таблице представлены результаты комплексных исследований по определению коррозионной стойкости модифицированной древесины в сравнении с натуральной березой и натуральной сосной.

Как следует из полученных данных, модификация древесины березы фенолоспиртом с добавками наноразмерных дисперсий КЗ и УНТ существенно увеличивает не только прочность образцов в сухом состоянии, но и способствует существенному повышению ее в условиях полного водонасыщения. Положительное воздействие модификации на свойства древесины проявляется во всех испытуемых средах при различных концентрациях.

Определение стойкости модифицированной древесины к агрессивным воздействиям сред животноводческих помещений показало, что полимер, заполняя структуру древесины, резко ограничивает рост мицелия в глубь пропитанного элемента, уменьшает скорость и уровень увлажнения древесины, повышает ее огне-, атмосферо- и химическую стойкость. Замедленная диффузия водных растворов и низкая скорость набухания древесины, пропитанной полимерами, обусловливает ее повышенную стойкость к агрессивным воздействиям животноводческих помещений, что выражается в малом снижении массы и прочности.

Стойкость модифицированной древесины в серной кислоте и растворе едкого кали, МПа

Показатель	Сосна натураль- ная	Береза натураль- ная	Береза модифицированная		
			феноло- спирт	феноло- спирт + КЗ	феноло- спирт + КЗ + + УНТ
Условный предел прочности при сжатии поперек волокон	<u>15,1</u> 6,7	<u>17,5</u> 9,4	<u>25,4</u> 18,2	<u>25,9</u> 20,4	<u>27,1</u> 17,2
То же, после 30 сут выдержки в 0,1N растворе KOH при 80 °C	<u>12,2</u> 3,5	<u>12,1</u> 3,6	<u>20,1</u> 12,1	<u>21,0</u> 12,1	<u>23,4</u> 11,5
То же, после 30 сут выдержки в 1N растворе H ₂ SO ₄ при 80 °C	<u>8,1</u> 2,5	<u>7,0</u> 2,4	<u>14,4</u> 7,2	<u>16,8</u> 9,4	<u>18,0</u> 12,9
То же, после 18 мес выдержки в 0,1N растворе KOH при 20–25 °C	<u>11,0</u> 3,1	<u>10,7</u> 3,2	<u>22,6</u> 16,1	<u>23,2</u> 18,9	<u>26,1</u> 19,4
Прочность при статическом изгибе	<u>135,2</u> 42,0	<u>168,3</u> 53,9	<u>162,1</u> 111,2	<u>183,3</u> 119,4	<u>192,0</u> 124,1
То же, после 30 сут выдержки в 0,1N растворе KOH при 80 °C	<u>88,1</u> 28,4	<u>72,6</u> 24,6	<u>168,3</u> 84,0	<u>170,0</u> 80,8	<u>184,1</u> 81,5
То же, после 30 сут выдержки в 1N растворе при 80 °C	<u>50,2</u> 18,9	<u>41,0</u> 18,0	<u>104,0</u> 56,2	<u>106,2</u> 50,4	<u>110,9</u> 48,6
То же, после 18 мес выдержки в 0,1N растворе KOH при 20–25 °C	<u>80,5</u> 24,8	<u>70,9</u> 21,1	<u>144,0</u> 100,6	<u>146,4</u> 108,1	<u>161,0</u> 126,4

Причание. В числителе – прочность в абсолютно сухом состоянии, в знаменателе – в водонасыщенном.

Заключение. Установлено, что применение традиционных фенолоформальдегидных модификаторов для защиты древесины эффективно, однако выделяемые при этом свободные фенол и формальдегид не позволяют рекомендовать данные составы для практической реализации. Доказано, что введение в состав полимерной композиции 10–15 % наноразмерных добавок, состоящих из 30%-го раствора кремнезоля и 2–4 % 3%-й дисперсии углеродных нанотрубок, позволяет снизить в 1,5–2 раза количество свободного фенола и формальдегида, что придает материалу экологическую безопасность при обеспечении повышенной водо-, био- и коррозионной стойкости. При этом сохраняются fungицидные свойства, способствующие длительному сопротивлению эксплуатационных воздействий и агрессивных сред животноводческих помещений.

Предложены эффективные методы повышения биологической и коррозионной стойкости деревянных элементов решетчатых полов путем модификации полимерными составами с наноразмерными добавками направленного действия, что повышает сопротивляемость древесины и обеспечивает нормальную работу в условиях воздействия агрессивных сред животноводческих помещений. Проведен комплекс лабораторных исследований, включая

полигонные испытания экспериментальных деталей пола из модифицированной древесины для определения зависимости прочностных, деформативных свойств и коррозионной стойкости при пропитке композициями с добавками направленного действия при воздействии эксплуатационных нагрузок и сред.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2605752 РФ. Способ получения модифицированной древесины / Пичугин А.П., Денисов С.А. и др.; № 2014153482/13; заявл. 26.12.2014; опубл. 27.12.2016; Бюл. № 36.
2. Пичугин А.П., Батин М.А., Кудряшов А.Ю., Митина Л.А. Деревянные полы повышенной стойкости для производственных сельскохозяйственных зданий: Моногр. Новосибирск: Новосиб. гос. аграр. ун-т, 2017. 140 с.
3. Пичугин А.П., Батин М.О., Банул В.В. Полы из модифицированных полимерными композициями материалов в сельском хозяйстве // Стройт. материалы. 2012. № 8. С. 80–82.
4. Хрулев В.М. Модифицированная древесина в строительстве. М.: Стройиздат, 1986. 112 с.
5. Хрулев В.М., Машкин Н.А., Дорофьев Н.С. Модифицированная древесина и ее применение. Кемерово: Кн. изд-во, 1988. 120 с.
6. Мартынов К.Ю. Комплексная защита древесины в строительных изделиях и конструкциях. Новосибирск: Наука, 1996. 126 с.
7. Машкин Н.А. Эксплуатационная стабильность модифицированной древесины в строительных изделиях: Моногр. Новосибирск, 2001. 261 с.
8. Батин М.О., Пичугин А.П. Биостойкость древесины в решетчатых полах животноводческих помещений // Мир науки, культуры, образования. 2012. № 1. С. 318–320.
9. Пичугин А.П., Бареев В.И., Батин М.О. Технологические особенности получения модифицированной древесины и ее основные свойства // Материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. «Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и фундаментов». Волгоград, 2011. С. 255–257.
10. Lowe D.E., Steen R.W.J., Beattie V.E. Preferences of housed finishing beef cattle for different floor types // Proc. of the Brit. soc. co animal science. Penicuik (Midlothian), 2000. P. 124.
11. Lowe D.E., Steen R.W.J., Beattie V.E. The performance and behaviour of finishing beef cattle accommodated during the winter of different floor types // Proc. of the Brit. soc. co animal science. Pecuik (Midlothian), 2000. P. 28–32.
12. Кное А., Шейб В. Фенольные смолы и материалы на их основе / Пер. с англ. М.: Химия, 1983. 280 с.
13. Негруцкий С.Ф., Синельщикова З.Н. Повреждение древесины дереворазрушающими грибами и меры по ее защите // Биологические повреждения строительных и промышленных материалов. Киев, 1978. С. 168–173.
14. Хрулев В.М. Прогнозирование прочности kleевых соединений деревянных конструкций. М.: Стройиздат, 1981. 128 с.
15. Нику Ю.П. Ускоренное определение устойчивости к грибкам целлюлозных материалов // Биологические повреждения строительных и промышленных материалов. Киев, 1978. С. 158–164.
16. Харук Е.В., Бауков О.А. Биологическая устойчивость древесины в связи с проницаемостью жидкостей // Биологические повреждения строительных и промышленных материалов. Киев, 1978. С. 188–189.

Пичугин Анатолий Петрович, д-р техн. наук, проф.;
E-mail: gmunsa@mail.ru
Новосибирский государственный аграрный университет
Батин Максим Олегович, канд. техн. наук, доц.
Новосибирский государственный аграрный университет
Кудряшов Александр Юрьевич, канд. техн. наук, доц.
Новосибирский государственный аграрный университет
Никитенко Ксения Анатольевна, асп.
Новосибирский государственный аграрный университет

Получено 26.10.17

Pichugin Anatoliy Petrovich, DSc, Professor;
E-mail: gmunsa@mail.ru
Novosibirsk State Agrarian University, Russia
Batin Maksim Olegovich, PhD, Ass. Professor
Novosibirsk State Agrarian University, Russia
Kudryashov Alexander Yurievich, PhD, Ass. Professor
Novosibirsk State Agrarian University, Russia
Nikitenko Kseniya Anatolievna, Post-graduate Student
Novosibirsk State Agrarian University, Russia

PERFORMANCE PROPERTIES OF WOOD THE MODIFIED POLYMER COMPOSITIONS WITH NANO-ADDITIONS

The results of obtaining and studying of the modified polymer compositions of wood, which has enhanced operating properties due to the integrated collaboration of the polymer component in the array. The positive results observed in the introduction in the polymer impregnating composition of nanosized additives that provide not only improved physical and mechanical properties and biostability, but also promotes the binding of free phenols and formaldehyde, which is important in the use of modified wood in floors of livestock buildings.

Key words: modification of wood, decay resistance, adsorption capacity, penetrant, nanoscale additives, water dispersion, silica Sol, carbon nanotubes.

REFERENCES

1. Pat. 2605752 RF. Sposob polucheniya modifitsirovannoy drevesiny [Method of producing a modified wood]. Pichugin A.P., Denisov S.A. etc.; No. 2014153482/13; appl. 26.12.2014; publ. 27.12.2016; Bull. No. 36. (in Russian)
2. Pichugin A.P., Batin M.A., Kudryashov A.Yu., Mitina L.A. Derevyannye poly povyshennoy stoykosti dlya proizvodstvennykh sel'skokhozyaystvennykh zdaniy [Wooden floors of a high-strength for agricultural production buildings]. Novosibirsk, Novosibirsk State Agrarian University, 2017. 140 p. (in Russian)
3. Pichugin A.P., Batin M.O., Banul V.V. Poly iz modifitsirovannykh polimernymi kompozitsiyami materialov v sel'skom khozyaystvye [Floors of the modified polymer compositions of materials in agriculture]. Stroitel'nye materialy [Construction materials]. 2012. No. 8. Pp. 80–82. (in Russian)
4. Khrulev V.M. Modifitsirovannaya drevesina v stroitel'stve [Modified timber in construction]. Moscow, Stroyizdat, 1986. 112 p. (in Russian)
5. Khrulev V.M., Mashkin N.A., Dorofeev N.S. Modifitsirovannaya drevesina i ee primenenie [Modified wood and its application]. Kemerovo, 1988. 120 p. (in Russian)

6. Martynov K.Yu. Kompleksnaya zashchita drevesiny v stroitel'nykh izdeliyakh i konstruktsiyakh [Complex protection of wood in construction products and structures]. Novosibirsk, Nauka, 1996. 126 p. (in Russian)
7. Mashkin N.A. Ekspluatatsionnaya stabil'nost' modifitsirovannoy drevesiny v stroitel'nykh izdeliyakh [Operational stability of modified wood in building products]. Novosibirsk, 2001. 261 p. (in Russian)
8. Batin M.O., Pichugin A.P. Biostoykost' drevesiny v reshetchatykh polakh zhivotnovodcheskikh pomeshcheniy [The biological stability of wood in slatted floors of livestock buildings]. Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya [World of science, culture, education]. 2012. No. 1. Pp. 312–320. (in Russian)
9. Pichugin A.P., Bareyev V.I., Batin M.O. Tekhnologicheskie osobennosti polucheniya modifitsirovannoy drevesiny i ee osnovnye svoystva [Technological peculiarities of obtaining the modified wood and its main properties]. Materialy VI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Nadezhnost' i dolgovechnost' stroitel'nykh materialov, konstruktsiy i fundamentov» [Materials of VI International scientific-technical conference «Reliability and durability of building materials, structures and foundations»]. Volgograd, 2011. Pp. 255–257. (in Russian)
10. Lowe D.E., Steen R.W.J., Beattie V.E. Preferences of housed finishing beef cattle for different floor types. Proc. of the Brit. soc. co animal science. Penicuik (Midlothian), 2000. P. 124.
11. Lowe D.E., Steen R.W.J., Beattie V.E. The performance and behaviour of finishing beef cattle accommodated during the winter of different floor types. Proc. of the Brit. soc. co animal science. Pecuik (Midlothian), 2000. Pp. 28–32.
12. Knoe A., Sheib V. Fenol'nye smoly i materialy na ikh osnove [Phenolic resins and materials on their basis]. Moscow, 1983. 280 p. (in Russian)
13. Negruskiy S.F., Sinel'shchikova Z.N. Povrezhdenie drevesiny derevorazrushayushchimi gribami i mery po ee zashchite [Damage to the wood mushrooms and measures for its protection]. Biologicheskie povrezhdeniya stroitel'nykh i promyshlennykh materialov [Biological damage of building and industrial materials]. Kiev, 1978. Pp. 168–173. (in Russian)
14. Khrulev V.M. Prognozirovaniye prochnosti kleevykh soedineniy derevyannykh konstruktsiy [Prediction of durability of adhesive joints of wooden structures]. Moscow, Stroyizdat, 1981. 128 p. (in Russian)
15. Nyuk Yu.P. Uskorennoe opredelenie ustoychivosti k gribkam tsellyuloznykh materialov [Rapid determination of resistance to fungi cellulose materials]. Biologicheskie povrezhdeniya stroitel'nykh i promyshlennykh materialov [Biological damage of building and industrial materials]. Kiev, 1978. Pp. 158–164. (in Russian)
16. Charuk E.V., Baulov O.A. Biologicheskaya ustoychivost' drevesiny v svyazi s pronitsaemost'yu zhidkostey [Biological stability of wood in connection with the permeability to liquids]. Biologicheskie povrezhdeniya stroitel'nykh i promyshlennykh materialov [Biological damage of building and industrial materials]. Kiev, 1978. Pp. 188–189. (in Russian)

УДК 691.11:674.031:539.4

Ж. САРАНТУЯА, Д. ДАШЖАМЦ, И.М. СЕБЕЛЕВ

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ МОНГОЛИИ

В данной статье обсуждаются результаты экспериментального исследования прочности на сжатие древесины вдоль волокон деревянных конструкций и их элементов, выполненных из лиственницы и эксплуатируемых от 6 до 385 лет в условиях Монголии. Оценены изменения свойств древесины деревянных конструкций от сроков и условий эксплуатации, которые для каждого объекта могут быть различными. Рассмотрено влияние плотности и установившейся влажности в зависимости от сроков и условий эксплуатации на прочность древесины лиственницы вдоль волокон.

Ключевые слова: лиственница, плотность, влажность, прочность на сжатие вдоль волокон, срок эксплуатации, условия эксплуатации, Монголия.

Введение. В Монголии имеются выполненные из деревянных конструкций объекты, представляющие собой культурную ценность: церкви, производственные и общественные здания, находящиеся в удовлетворительном состоянии независимо от срока их эксплуатации. Однако информации об изменении физико-механических свойств таких конструкций за время эксплуатации крайне мало [1]. Достаточная несущая способность деревянных конструкций в течение всего периода эксплуатации предусмотрена действующими нормативно-техническими документами, в которых учитывается специфика работы древесины как конструкционного материала, изменение прочности в зависимости от температурно-влажностных условий эксплуатации и времени действия нагрузки и другие факторы [2]. Содержание влаги является важным фактором, влияющим на физико-механические свойства древесины. По утверждению В.Н. Волынского [3] предел прочности древесины на сжатие вдоль волокон очень сильно зависит от ее влажности. Исследованиями А.А. Винокурова [4] установлено, что на прочность древесины существенно влияет действие отрицательной температуры: чем больше влажность древесины, тем выше прочность.

Цель данной работы – определение влияния срока и условий эксплуатации деревянных конструкций из лиственницы в местных условиях на прочность на сжатие древесины вдоль волокон.

Исследования по определению прочности на сжатие проводились на образцах из деревянных конструкций 19 сооружений с различными сроками эксплуатации – от 6 до 385 лет. Результаты этих испытаний сравниваются

с прочностью на сжатие новой лиственницы. В разных источниках показатели прочности древесины хвойных пород выражены различными единицами измерения [5]. Для прочности на сжатие вдоль волокон нами был выбран вариант, используемый в настоящее время в нормативной документации, – мегапаскаль (МПа).

Физико-механические свойства древесины эксплуатируемых конструкций (прочность, плотность, влажность) необходимо рассматривать с учетом условий ее эксплуатации: температуры и влажности окружающей среды, напряженного состояния [6]. В Монголии обычно это классы сред, указанные в табл. 1 в соответствии с СП 64.13330.2011 «Деревянные конструкции.

Таблица 1. Основные классы условий эксплуатации древесины в Монголии при температуре 20 °С, %

Класс условий эксплуатации	Эксплуатационная влажность древесины	Максимальная влажность воздуха
1А	До 8	40
1	8–12	65

изготовлено по 20 образцов, представляющих собой прямоугольную призму с поперечным сечением 20×20 мм и длиной вдоль волокон 30 мм. Изготовление и подготовка образцов древесины к испытаниям соответствовали ГОСТ 16483.0–71 «Древесина. Методы испытаний. Общие требования». После испытания на прочность определяли влажность каждого образца по ГОСТ 16483.7–71 «Древесина. Методы определения влажности (с Изменениями № 1, 2, 3)». Испытания прочности на сжатие вдоль волокон проведены по стандарту MNS 2471–88 «Древесина. Методы определения предела прочности на сжатие вдоль волокон» в Биомеханической лаборатории Монгольского государственного университета науки и технологии на машине универсального типа марки MTS производства США (табл. 2).

Для оценки зависимости прочности древесины от сроков ее эксплуатации и сравнения прочности древесины разных сроков с прочностью новой лиственницы был проведен предварительный разведочный анализ данных (OnLine Analytical Processing, OLAP) с помощью статистических инструментов менеджмента качества и средств программного комплекса EXCEL. Эти методики соответствуют одному из основных требований такого подхода – инструменты для обработки сырых данных должны быть просты в использовании.

Вначале изучили временные графики прочности, плотности и влажности древесины, по которым можно оценить вероятность наличия и возможную форму зависимости этих показателей от сроков эксплуатации.

Анализ полученных данных (рис. 1) позволяет предложить следующие гипотезы:

1) прочность древесины объектов в среднем возрасте соответствует прочности древесины новой лиственницы;

Актуализированная редакция СНиП II-25-80 (с изменением № 1)».

Показатели прочности древесины зависят от направления действия сил по отношению к расположению волокон и изменяются при увлажнении и высушивании [7].

Для каждого объекта было

Таблица 2. Результаты испытания прочности на сжатие вдоль волокон древесины

№ образца	Объект	Срок эксплуатации, год	Образец			Предел прочности на сжатие	Прочность, приведенная к стандартной влажности 12 %, МПа
			влажность, %	плотность, г/см ³	площадь поперечного сечения, см ²		
1	Новая лиственница	1	6,8	0,70	3,87	67,7	53,5
2	Жилое здание «Красивый дом»	6	6,7	0,60	4,03	58,0	45,7
3	Торговый центр «Нарантуул»	7	6,2	0,50	4,01	55,0	42,2
4	Монастырь Христа	17	6,3	0,60	3,88	54,7	42,2
5	Мастерская плотников ПТУ	44	6,2	0,50	4,13	56,0	43,1
6	Жилое здание «III – 36»	45	6,8	0,50	3,93	57,5	45,5
7	Учебный корпус ПТУ	46	6,7	0,60	3,92	62,5	49,2
8	Здание Дома правительства	55	7,1	0,60	3,94	61,4	49,3
9	Центральный стадион г. Цэцэрлэг	57	7,2	0,60	4,03	53,3	43,0
10	Спортивный зал	60	7,8	0,60	3,75	57,4	47,7
11	Клуб ПТУ	61	6,2	0,49	3,96	54,8	42,1
12	Общеобразовательная школа № 1	76	7,1	0,58	4,12	57,6	46,2
13	Университет обороны	81	6,6	0,63	4,11	68,7	53,7
14	Первое здание почтовой службы	98	5,8	0,45	4,20	53,6	40,4
15	Университет обороны	103	6,5	0,50	4,07	53,4	41,5
16	Цирковое училище	113	6,1	0,49	4,07	53,7	41,1
17	Летняя резиденция Богд хана	179	6,5	0,62	4,10	59,3	46,2
18	Краеведческий музей	214	7,0	0,51	3,94	48,1	38,5
19	Цогчин дуган	385	7,5	0,59	3,83	51,0	41,8
Средние значения		–	6,7	0,60	4,00	60,0	44,9

2) прочность древесины объектов в раннем и позднем возрасте меньше прочности древесины новой лиственницы.

Далее мы построили интегральные временные графики как контрольные карты в стандартной форме, в которой показатели прочности и плотности нормированы

$$Z_i = \frac{(R_i - R_m)}{\sigma}.$$

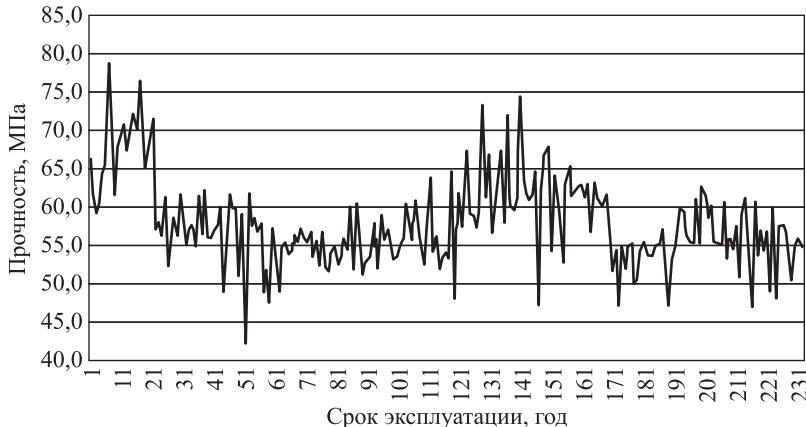


Рис. 1. График зависимости прочности лиственницы от сроков эксплуатации

К первичным показателям можно перейти по формуле обратного преобразования

$$R_i = \sigma Z_i + R_m,$$

здесь σ – среднеквадратическое отклонение показателя;

R_i – прочность или плотность;

R_m – среднее указанных показателей;

Z_i – нормированное значение этих показателей.

С помощью такого приведения к стандартной форме можно на одном графике показать и сравнить поведение различных по своей природе и масштабу показателей [8] (рис. 2).

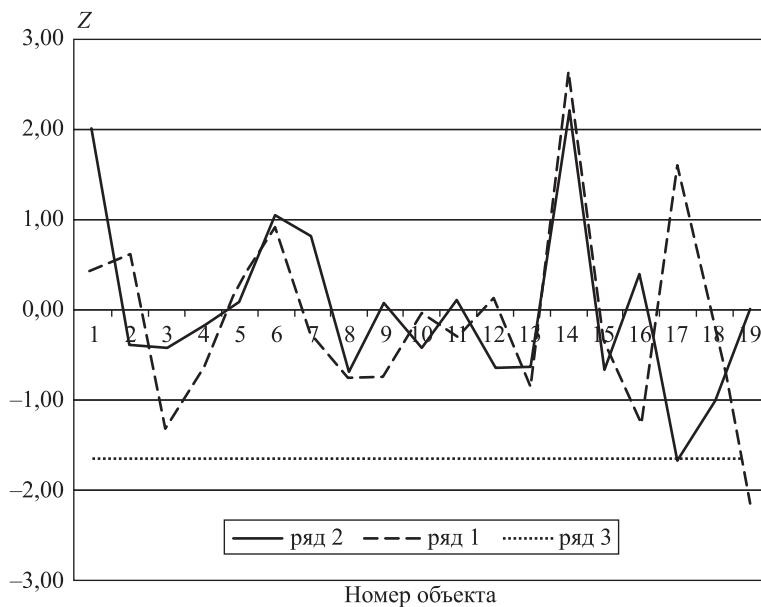


Рис. 2. Карты Шухарта в стандартной (Z -форме) для прочности и ее дисперсии

ряд 1 – дисперсия; ряд 2 – прочность; ряд 3 – уровень характеристической прочности

Величину нормативного сопротивления древесины R^H , МПа (характеристическую прочность аналогично бетону) согласно СП 64.13330.2011 (Приложение В – обязательное) определяют из условия

$$R^H = R^{BP}(1 - 1,65v),$$

где v – коэффициент вариации показателей прочности по данным испытаний; R^{BP} – среднее значение распределения (величина временной прочности материала), МПа;

1,65 – квантиль в предполагаемой статистической функции распределения с обеспеченностью 0,95, для которой определяется характеристическая прочность (норма).

По графикам (рис. 3), например, можно оценить поведение прочности и ее вариации в зависимости от срока эксплуатации и проверить выдвинутые гипотезы с помощью традиционных статистических методик из арсенала EXCEL – критерия Фишера для дисперсий и критерия Стьюдента для средних. Таким образом, решается задача сравнения показателей древесины эксплуатируемой лиственницы с новой лиственницей.

Анализ графиков позволяет сделать предположение, что средние показатели не точно отражают достоверность их различий, так как не учитывают вариацию сравниваемых показателей, в частности, прочности. Графики свидетельствуют о том, что вариация показателей далека от стабильной. Это затрудняет традиционную операцию сравнения средних. Сравнение информации, имеющейся на графиках, позволяет предположить, что выводы об отличии прочности, например, новой лиственницы от лиственницы, находящейся в эксплуатации, будут зависеть от того, каким показателем прочности будет оцениваться прочность древесины (рис. 3).

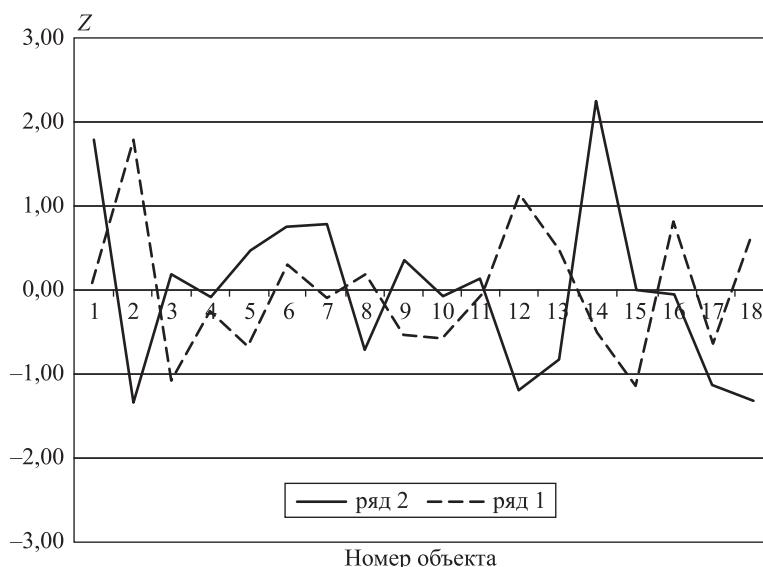


Рис. 3. Сравнение зависимости прочности и характеристической прочности от сроков эксплуатации
ряд 1 – прочность; ряд 2 – характеристическая прочность

Можно поступить традиционно и провести попарное сравнение показателей с учетом гомоскедастичности показателей, т.е. однородности дисперсий. Предварительное применение критерия Фишера необходимо для выбора нужного типа критерия Стьюдента сравнения средних (*t*-test).

В табл. 3 приведены результаты однофакторного дисперсионного анализа показателей прочности древесины на сжатие при условии однородности ее дисперсий.

Можно было бы сделать вывод, что величина критерия Фишера *F*, значительно превышающая *F* критическое, свидетельствует о достоверности различия средних показателей прочности лиственницы от сроков ее эксплуатации. Но это, как показывают графики, может быть некорректным выводом по двум причинам. Первая, дисперсии гетероскедастичны и, значит, дисперсионный анализ различий средних неприменим, а вторая причина заключается в том, что средние показатели не всегда бывают представительны для характеристики совокупностей данных. В данном случае возможно, как и в случае оценки прочности бетона, предпочтительнее использовать характеристическую прочность, которая учитывает вариацию и обеспечена с 95%-й до-

Таблица 3. Результаты проверки первой гипотезы

Показатель	Новая лиственница	Университет обороны (81 год)
<i>Двухвыборочный F-тест для дисперсии</i>		
Среднее	6,78	6,88
Дисперсия	0,24	0,84
Наблюдения	21	21
<i>df</i>	20	20
F	0,29	
<i>P(F <= f)</i> одностороннее	0,00	
F критическое одностороннее	0,47	
	Нет разницы	
<i>Двухвыборочный t-тест с одинаковыми дисперсиями для средних</i>		
Среднее	6,78	6,88
Дисперсия	0,24	0,84
Наблюдения	21	21
Объединенная дисперсия	0,5	
Гипотетическая разность средних	0,0	
<i>df</i>	40	
t-статистика	-0,43	
<i>P(T <= t)</i> одностороннее	0,33	
<i>t</i> критическое одностороннее	1,68	
<i>P(T <= t)</i> двустороннее	0,67	
t критическое двустороннее	2,02	
	Нет разницы	

Таблица 4. Результаты проверки второй гипотезы

Показатель	Новая лиственница	Монастырь Христа
<i>Двухвыборочный F-тест для дисперсии</i>		
Среднее	6,78	5,47
Дисперсия	0,24	0,02
Наблюдения	21	21
<i>df</i>	20	20
F	10,42	
$P(F \leq f)$ одностороннее	0,00	
F критическое одностороннее	2,12	
	Есть разница	
<i>Двухвыборочный t-тест с различными дисперсиями</i>		
Среднее	6,78	5,47
Дисперсия	0,24	0,02
Наблюдения	21	21
Гипотетическая разность средних	0	
<i>df</i>	24	
t-статистика	11,57	
$P(T \leq t)$ одностороннее	0,00	
t критическое одностороннее	1,71	
$P(T \leq t)$ двустороннее	0,00	
t критическое двустороннее	2,06	
	Есть разница	

верительной вероятностью, так как, по сути, является пятым процентилем или 0,05 квантилью. Поэтому было проведено попарное сравнение данных для новой лиственницы с данными для остальных случаев.

Приведем два примера разных соотношений дисперсий (табл. 3, 4).

Различия средних показателей прочности по первой гипотезе не обнаружены, а по второй – выявлены.

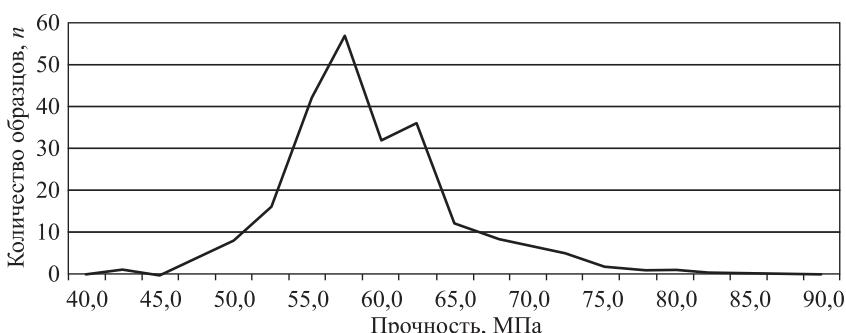


Рис. 4. Гистограмма прочности на сжатие вдоль волокон

Возникающие гипотезы можно подтвердить или подвергнуть сомнению с помощью еще одного инструмента менеджмента качества – гистограмм. На рис. 4 приведена гистограмма распределения прочности. Их анализ позволяет выдвинуть гипотезу, что двугорбость этого распределения неслучайна и свидетельствует о неоднородности исходных данных, возможно, обусловленной различиями в условиях эксплуатации.

С помощью инструмента «корреляционное поле» оценили вид и значимость зависимости показателя прочности от плотности и влажности (рис. 5).

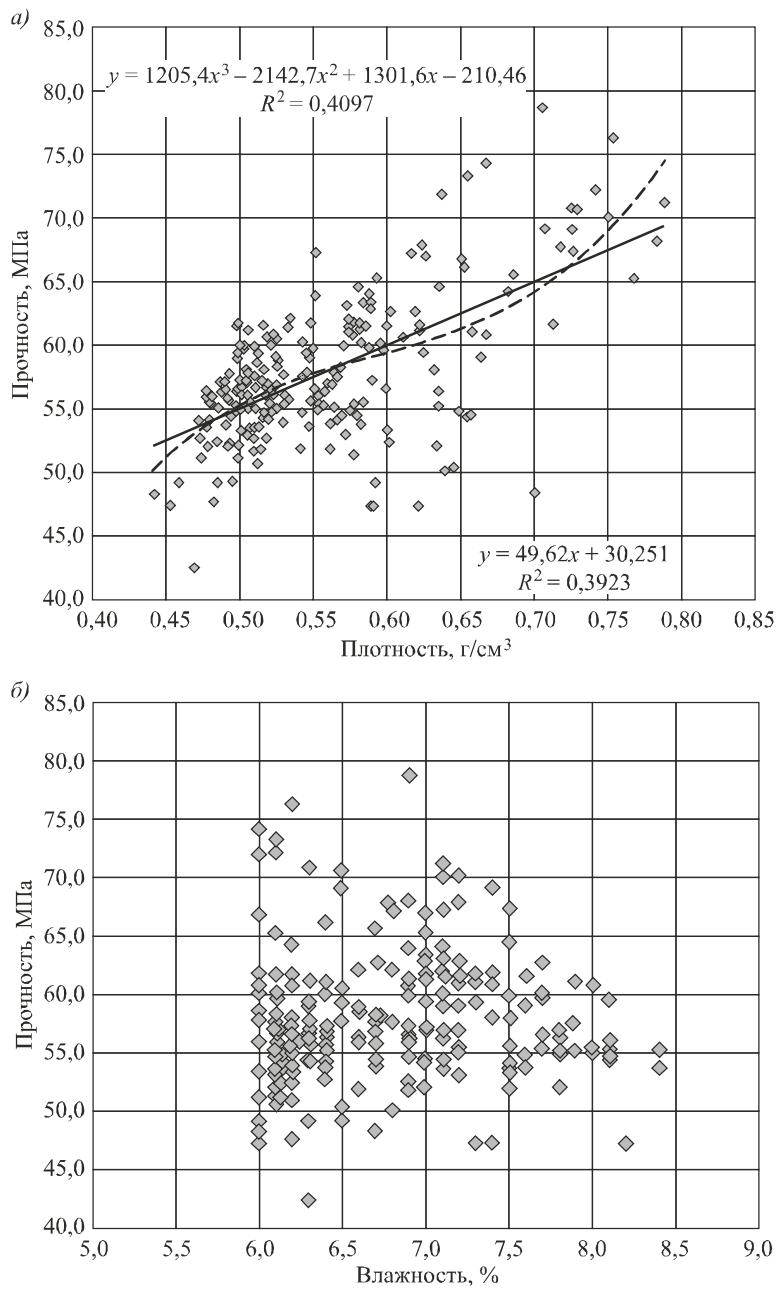


Рис. 5. Диаграмма рассеяния (корреляционное поле) прочности и плотности (а); прочности и влажности (б)

У одного строения зависимость между плотностью и прочностью не выявляется обычно, но на совокупности объектов разных сроков эксплуатации возможно удастся ее обнаружить.

Средствами EXCEL подобрана форма и проверена ее значимость. Согласно полученным коэффициентам детерминации R^2 , зависимость прочности при сжатии вдоль волокон при длительном нахождении древесины лиственницы в условиях Монголии наилучшим образом описывают параболическая (полиномиальная) и линейная функции. На таком объеме данных значение коэффициента детерминации свидетельствует о достоверности связи, а близость этих коэффициентов для линейной и нелинейной формы дает основание утверждать, что уравнение связи можно представить в форме

$$Y = 49,6p + 30,3.$$

В данном случае форма корреляционного поля позволяет сделать вывод об отсутствии связи между прочностью и влажностью для исследуемого набора данных.

Выводы. 1. Результаты исследования показывают, что на свойства древесины лиственницы в Монголии в большей степени оказывают влияние местные условия эксплуатации, а не срок.

2. Выявлено только сохранение и уменьшение прочности древесины лиственницы, а повышение прочности не было обнаружено.

3. Необходимо выполнить дополнительные исследования по изучению различий условий эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bazar G., Duinkherjav Ya. Constructions of Wood and Plastics. UB, 2006. 322 p.
2. Стрельцов Д.Ю. Напряженно-деформированное состояние деревянных конструкций при длительной эксплуатации: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2003. 168 с.
3. Волынский В.Н. Взаимосвязь и изменчивость показателей физико-механических свойств древесины. 2-е изд. Архангельск: АГТУ, 2006. 196 с.
4. Винокуров А.А., Докторов И.А., Лавров М.Ф. Влияние отрицательной температуры и влаги на прочность цельной и клееной древесины // Вестн. Сев.-Восточ. федер. ун-та им. М.К. Аммосова. 2006. Т. 3, № 3. С. 98–101.
5. Klausen D., Hoscheid R., Lieblang P. Technologie der Baustoffe. Berlin: VDE VERLAG GMBH, 2013. 836 S.
6. Курьянова Т.К., Платонов А.Д., Федоткин Н.И., Фокина И.С. Исследование прочности древесины при длительной нагрузке // Лесотехн. журн. 2012. № 2. С. 7–10.
7. Микульский В.Г., Сахаров Г.П. и др. Строительные материалы (Материаловедение. Технология конструкционных материалов): Учеб. изд. М.: Изд-во АСВ, 2007. 520 с.
8. Карасев Н.П., Себелев И.М. Статистические методы контроля качества цемента в ГОСТ 30515–2013 // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 5. С. 12–21.

Сарантуя Жанлав, ст. препод.; E-mail: saraa_janlab [saraa_125@yahoo.com]
Монгольский государственный университет науки и технологии (МонГУНТ),
Улан-Батор, Монголия

Дашжамц Далай, действительный член Академии наук Монголии, д-р техн. наук, проф.; E-mail: Dashjamts Dalai [d_dashjamts@yahoo.com]

Монгольский государственный университет науки и технологии (МонГУНТ), Улан-Батор, Монголия

Себелев Иван Михайлович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: isebelev@yandex.ru

Системно-аналитический центр «Стройконсалтинг», г. Новосибирск

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 13.10.17

Sarantuyaа Zhanlav, Senior Lecturer; E-mail: saraa janlab [saraa_125@yahoo.com]

Mongolian University of Science and Technology (MUST), Ulan-Bator, Mongoliya

Dashzhamts Dalay, Full Member of Mongolian Academy of Sciences, DSc, Professor; E-mail: Dashjamts Dalai [d_dashjamts@yahoo.com]

Mongolian University of Science and Technology (MUST), Ulan-Bator, Mongoliya

Sebelev Ivan Mikhaylovich, DSc, Professor; E-mail: isebelev@yandex.ru

System-analytical center «Stroykonsalting», Novosibirsk, Russia

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

INVESTIGATION CHANGES OF STRENGTH ON COMPRESSION OF ELEMENTS OF WOODEN CONSTRUCTIONS EXPLOITED IN MONGOLIA CONDITIONS

This article discusses the results of an experimental study of the compressive strength of wood along fibers made of larch which operated from 6 to 385 years in Mongolia's conditions of wooden structures and their elements. The assessment of the change in the properties of wood of wooden structures from the terms and conditions of operation, which for each object may be different. The influence of density and steady-state humidity, depending on the terms and conditions of operation on the strength of larch wood along the fibers, is considered.

К e y w o r d s: larch, density, humidity, compression strength along fibers, service life, operating conditions, Mongolia.

REFERENCES

1. Bazar G., Duinkherjav Ya. Constructions of Wood and Plastics. UB, 2006. 322 p.
2. Strel'tsov D.Yu. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie derevyannykh konstruktsiy pri dlitel'noy ekspluatatsii [Stressed conditions of long term used timber structure]. Moscow, 2003. 168 p. (in Russian)
3. Volynskiy V.N. Vzaimosvyaz' izmenchivost' pokazateley fiziko-mekhanicheskikh svoystv drevesiny [Interrelation and variability of indicators of physical and mechanical properties of wood]. Arkhangel'sk, 2006. 196 p. (in Russian)
4. Vinokurov A.A., Doktorov I.A., Lavrov M.F. Vliyanie otritsatel'noy temperatury i vlagi na prochnost' tsel'noy i kleenoy drevesiny [Influence of negative temperature and moisture on the strength of solid and glued wood]. Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova [M.K. Ammosov Vestnik Northeastern Federal University]. 2006. Vol. 3, No. 3. Pp. 98–101. (in Russian)
5. Klausen D., Hoscheid R., Lieblang P. Technjlogie der Baustoffe. Berlin: VDE VERLAG GMBH, 2013. 836 S.

6. K ur' yan ova T.K., P laton o v A.D., F edot k in N.I., F okin a I.S. Issledovanie prochnosti drevesiny pri dlitel'noy nagruzke [Investigation of the strength of wood under long-term load]. Lesotekhnicheskiy zhurnal [Forestry Engineering Journal]. 2012. No. 2. Pp. 7–10. (in Russian)
 7. M ikul'skiy V.G., S akhar o v G.P. et al. Stroitel'nye materialy (Materialovedenie. Tekhnologiya konstruktsionnykh materialov) [Building Materials (Materials Science, Technology of Structural Materials)]. Moscow, 2007. 520 p. (in Russian)
 8. K arasev N.P., S ebel ev I.M. Statisticheskie metody kontrolya kachestva tsementa v GOST 30515–2013 [Statistical methods for quality control of cement in state standard 30515–2013]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No. 5. Pp. 12–21. (in Russian)
-

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ, ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКОЛОГИИ



УДК 712.4

О.О. СМОЛИНА

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОУСТОЙЧИВОСТИ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

В статье предложены два способа повышения экоустойчивости городских территорий. Первый способ: создание наиболее благоприятных условий для произрастания элементов озеленения, второй – использование бионических малых архитектурных форм (и/или элементов городской среды) – объектов арборескульптуры на территории застройки. Первый способ нацелен на грамотное проектирование дендрологического плана земельного участка, поэтапное составление которого должно производиться с учетом следующих аспектов: экологического паспорта, аллелопатии, фитопатологии древесных растений, сводного плана инженерных сетей, схемы вертикальной планировки территории, планировочной структуры и функциональной организации территории застройки. Основные положения первого способа повышения экоустойчивости территории вошли в научно-практические рекомендации.

Ключевые слова: экоустойчивость, озеленение, древесные растения, арборескульптура, экологический паспорт, аллелопатия.

Актуальность исследования. В условиях все возрастающей урбанизации и индустриализации возникает необходимость сохранения, поддержания и охраны природных ландшафтов, зеленых массивов и рекреационных зон. В связи с современными тенденциями стратегическое развитие территорий и поселений планируется проводить в ракурсе экоустойчивости.

«Экоустойчивость» – это повышение социотехноэффективности ресурсопользования при эксплуатации урбанизированных территорий. Экоустойчивый анализ территории, в разрезе наполнения антропогенного ландшафта элементами «живой» среды, выявляет несколько выраженных векторов гуманизационной организации городского пространства, таких как сохранение флоры и фауны; охрана природного комплекса ради самой природы; обеспечение экологически безопасного развития общества относительно окружающей природной среды [1].

«Одной из форм претворения в жизнь новых принципов должно стать изменение отношения к потреблению. Человек, как потребитель, обязан учитывать интересы других живых видов и всей планеты в целом: недопустимы жестокая эксплуатация земли, уничтожение лесов, уничтожение мест обитания животных, развитие экономики и промышленности, изменяющей климат

планеты. Да и для самого человека, как части природы, необходима устойчивая, здоровая и социально ориентированная среда обитания...» [2].

Для создания экоустойчивой среды жизнедеятельности человека в данной научной статье ставилась *цель*: рассмотреть способы повышения экоустойчивости урбанизированных территорий и разработать для каждого из них научно-практические рекомендации по применению.

Первый способ повышения экоустойчивости территории застройки – создание наиболее благоприятных условий для произрастания элементов озеленения.

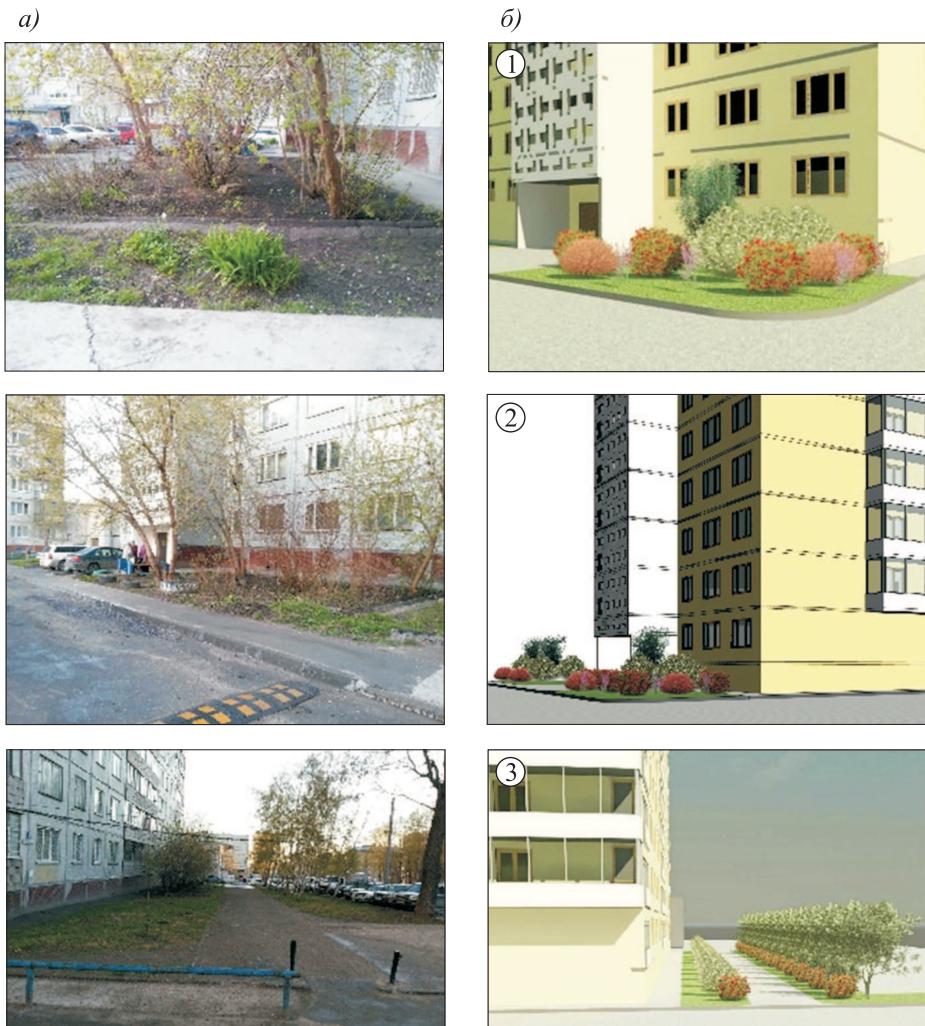
Рассмотрим основные аспекты, необходимые при составлении дендрологического плана.

1. Экологический паспорт, фитопатология и аллелопатия элементов озеленения. При проектировании различных способов озеленения улиц (рядовая (групповая) посадка; зеленые островки регулирования движения транспорта и пешеходов; палисадники, аллеи, скверы, «карманные парки»; зеленые разделительные полосы; зеленые технические коридоры) нужно учитывать экологический паспорт, фитопатологию и аллелопатию каждого запроектированного элемента озеленения на дендрологическом плане земельного участка. Комплексный подход к проектированию элементов озеленения ориентирован на выбор наиболее предпочтительного места для их произрастания.

Экологический паспорт растений включает в себя данные о темпах роста, требованиях к почве, влажности и инсоляции территории, а также содержит сведения о газоустойчивости растений и др. Для каждого вида древесного растения необходимо разрабатывать экологический паспорт, опираясь на данные которого при проектировании становится возможным группировка наиболее предпочтительных древесно-кустарниковых пород согласно геоморфологическим, гидрологическим, климатическим условиям их посадки. К примеру, на основании полученных данных по инженерно-геологическим изысканиям, территория рекреации не имеет вблизи 100 м поверхностных и подземных источников водоснабжения, вследствие этого влажностный режим территории низкий. На данной территории могут произрастать только те древесные растения, которые согласно экологическому паспорту приспособлены к обитанию в менее увлажненной среде.

Кроме инженерных изысканий необходимо заблаговременно оперировать информацией об инсоляции, аэродинамике, архитектурно-планировочной организации территории застройки, для того чтобы из существующего ассортимента древесных растений регионов России подобрать те виды, у которых требования к месту произрастания (по данным экологического паспорта) приближенно совпадают с градостроительными особенностями территории застройки. Пример формирования групповой посадки древесных растений с учетом их экологических паспортов представлен на рис. 1.

Для растений на каждом этапе роста с учетом сезонности нужно учитывать требования к влажности почвы. Рекомендуется обеспечивать глубинный способ полива (на глубину 15–20 см) и помнить, что различным древесным



растениям необходимо разное количество влаги. Лучшим временем полива считается ранний вечер, когда уменьшается испарение с поверхности почвы. За сезон древесные растения необходимо полить 7–10 раз и закончить полив в августе для нормальной подготовки их к зиме. В засушливое лето полив можно продолжить до глубокой осени [3]. После полива нужно замульчировать почву в приствольном круге (торфом, землей) или прикрыть скошенной травой, если приствальное пространство организовано без высадки газонной травы (посадка газона в приствольную решетку – наиболее предпочтительный вариант).

Фитопатология древесных растений подробно рассмотрена доктором биологических наук, профессором И.И. Минкевичем. Рекомендуется в случае обнаружения заболевания у древесных и/или кустарниковых пород своевременно производить их лечение, посредством введения лекарственных препаратов через корни, надземные органы или инъекцией в ствол. Для повышения устойчивости древесных растений к грибным болезням необходимо использовать биологически активные вещества – подкормку древесных растений [4]. Подкормку производить в зависимости от их требований,

в)

Параметры элементов озеленения		1. Тuya западная (<i>Thuya occidentalis</i>)	2. Рододендрон (<i>Polygonia's Daughter</i>)	3. Дерен белый (<i>Elegantissima</i>)	4. Сосна мутус (<i>Pinus Mugo Mughus</i>)	5. Кизильник горизонтальный (<i>Cotoneaster horizontalis</i>)
Жизненная форма	Д	К	К	К	К	К
Происхождение	И	И	И	И	И	И
Темпы роста	скорость	↓	↔	↑	↓	↔
	высота в 10 лет, м	2	1	1,5	0,5	0,4
	d ствола в 10 лет, см	15	8	10	12	6
	max d ствола, см	70	2,5	12	15	8
	max высота, м	20	1,3	0,7	2,5	3
Требования	к освещению	●	●	●	○	●
	составу почвы	■	■	■	■	■
	влажности почвы	▼	▼	▼	▼	▼
	плодородию почвы	▲	▲	▲	▲	▲
	Зимостойкость	1	1	1	1	1
	Засухоустойчивость	—	—	+	+	+
	Цветение, с мес	IV	V	VI	VI	V
	Плодоношение, с года	8	10	3	8	5
	Газоустойчивость	1	1	1	1	1
	Продолжительность жизни, лет	100	30	50	500	50

П р и м е ч а н и е. Жизненная форма: Д – дерево, К – кустарник. Происхождение: И – интродуктент. Скорость роста: ↑ – быстрый, ↔ – умеренный, ↓ – медленный. Требования к освещению: ○ – гелиофит, ● – сциофит; к составу почвы: ■ – суглинок; к влажности почвы: ▼ – гигрофит, ▲ – мезофит; к плодородию почвы: ▲ – эвтроф, △ – мезотроф. Зимостойкость: 1 – не промерзает. Засухоустойчивость: + – да, – – нет. Газоустойчивость: 1 – очень устойчивые.

Рис. 1. Проектирование групповой и рядовой посадки элементов озеленения с учетом экологического паспорта. Автор проекта Голушки Ксения, студентка НГАСУ (Сибстрин)

а – существующая ситуация озеленения; б – планируемое решение: 1 – пейзажное размещение растений (миксбордер); 2 – регулярное размещение растений (тип «Кен-конс»); 3 – регулярное размещение растений (тип «Роща», «Кен-конс»); в – экологический паспорт проекта

указанных в экологическом паспорте, а также по возможности утеплять элементы озеленения в холодный период года при помощи обвалования их снегом или дополнительно укрывать защитными утепляющими материалами.

«Аллелопатическое взаимодействие растений» друг на друга можно подразделить на химическое и физическое. Под физическим взаимодействием подразумевается создание определенного микроклимата, когда более высокие растения создают частичное затенение и повышенную влажность для растений нижнего яруса. Химическое взаимодействие сводится к тому, что надземные части растений могут выделять пахучие вещества, отпугивающие вредителей, а корневые системы выделяют различные органические вещества.

ва, среди которых есть витамины, сахара, органические кислоты, ферменты, гормоны, фенольные соединения...» [5].

«Не рекомендуется рядом с растущими кустарниками высаживать березу, поскольку ее мощная корневая система потребляет много воды и обделяет в этом плане расположенные по соседству растения. Подобное воздействие оказывают также ель и клен. Благоприятным аллелопатическим взаимодействием можно считать следующие посадки древесно-кустарниковых пород: дуб красный с ясенем обыкновенным и/или с березой повислой; ель европейская с лиственницей и др.» [6]. Следует отметить, что согласно аллелопатии береза совместима с яблоней и вишней; дуб с яблоней, липой и кленом.

2. Сводный план инженерных сетей. При посадке деревьев в зонах действия теплотрасс рекомендуется учитывать фактор прогревания почвы в обе стороны от оси теплотрассы на расстояние: интенсивного прогревания – до 2 м, среднего – 2–6, слабого – 6–10 м. У теплотрасс не рекомендуется размещать липу, клен, сирень, жимолость – ближе 2 м; тополь, боярышник, кизильник, дерен, лиственницу, березу – ближе 3–4 м [7].

3. Схема вертикальной планировки территории. При выполнении схемы вертикальной планировки территории застройки на основании анализа аккумуляции поверхностного стока целесообразнее произвести дополнительную сверку местоположения древесных растений с показателями их предпочтительности к влажности почв, которые указаны в экологическом паспорте. Так, на схеме вертикальной планировки территории застройки может обнаружиться скопление дождевого стока, к примеру, вблизи придомовых площадок, где согласно плану озеленения предполагается высадка невлаголюбивых растений. Если своевременно не произвести корректировку дендрологического плана и схемы вертикальной планировки территории, элементы озеленения будут подвержены постоянному подтоплению корневой системы, что приведет впоследствии к их гибели.

В зонах скопления условно чистого поверхностного стока (например, с газона) рекомендуется проектировать влаголюбивые древесные растения. При помощи открытых желобов, водоотводящих элементов – лотков, кюветов, к примеру, вымощенных натуральными камнями или габионами, возможна организация перехвата условно чистого поверхностного стока с зон его сосредоточения в места высадки элементов озеленения для их полива.

4. Планировочная структура и функциональная организация территории застройки. Вблизи элементов озеленения необходимо выполнять ограждающую конструкцию (например, декоративную металлическую решетку) или высаживать древесные растения на подпорных стенках (выполняя террасирование, например, блоками «Макволл») для защиты от вандализма и повреждения автотранспортом и уборочной техникой при парковке и въезде/выезде.

Кроме того, данное мероприятие защитит древесные растения от воздействия антигололедных реагентов в зимний период и предотвратит попадание в приствольную решетку загрязненного поверхностного стока с лестниц, дорожек, проездов.

Рекомендуется соблюдать нормативные расстояния между элементами озеленения и автодорогой согласно СП 42.13330. 2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений», следовать технологическим операциям (учитывая их периодичность за сезон) по уходу за посадками деревьев и кустарников по таблицам [3], разработанным доктором географических наук, профессором А.С. Курбатовой, учитывать морфологию растений для объемно-пространственных композиций в соответствии с задуманным художественным образом и колористическим решением ландшафтного проекта. Только на основании комплексного подхода к проектированию древесных растений становится возможным создание наиболее благоприятных условий для их произрастания.

Вторым способом повышения экологической устойчивости является внедрение на территорию застройки бионических элементов благоустройства – объектов арборскульптуры. Арборскульптура – это искусство формирования из древесных растений различных архитектурно-художественных форм. Наблюдается активное выращивание бионических малых архитектурных форм за рубежом, а также возрастающий отечественный интерес к данному виду искусства [8].

Новизной научного исследования является впервые предложенный способ бионического благоустройства в качестве повышения экологической устойчивости территории застройки.

Существует следующие категории практического использования объектов экsterьера арборскульптуры на открытых пространствах [9].

1. Объекты городских сооружений:
 - 1.1. Объекты функционального позиционирования (городские ориентиры, информационные и рекламные табло и т. д.);
 - 1.2. Объекты для временного проживания (кемпинги);
 - 1.3. Оборудование для общественных мест:
 - 1.3.1. Объекты торгового назначения шаговой доступности (павильоны, рынки и т. д.);
 - 1.3.2. Комплексное благоустройство города (остановки, развязки и др.).
2. Объекты малых архитектурных форм:
 - 2.1. Садовая мебель:
 - 2.1.1. Стулья, скамьи;
 - 2.1.2. Столы;
 - 2.1.3. Беседки;
 - 2.2. Элементы ограждений;
 - 2.3. Оборудование для детских / спортивных площадок;
 - 2.4. Садово-парковая скульптура:
 - 2.4.1. Разные типы городской скульптуры;
 - 2.4.2. Сакральные объекты.

Как видно из классификации, объекты арборскульптуры могут использоваться достаточно обширно, но их внедрение в России незначительно по сравнению с зарубежными странами, такими как США, Германия, Австралия и т.д. Однако их успешное «выращивание» и возрастающая значимость по достоинству оценена ландшафтными дизайнерами, архитекторами, урбанистами. Арборскульптурные объекты – это объекты живой природы, внедрение которых в городскую среду в качестве элементов бионического благоустройства

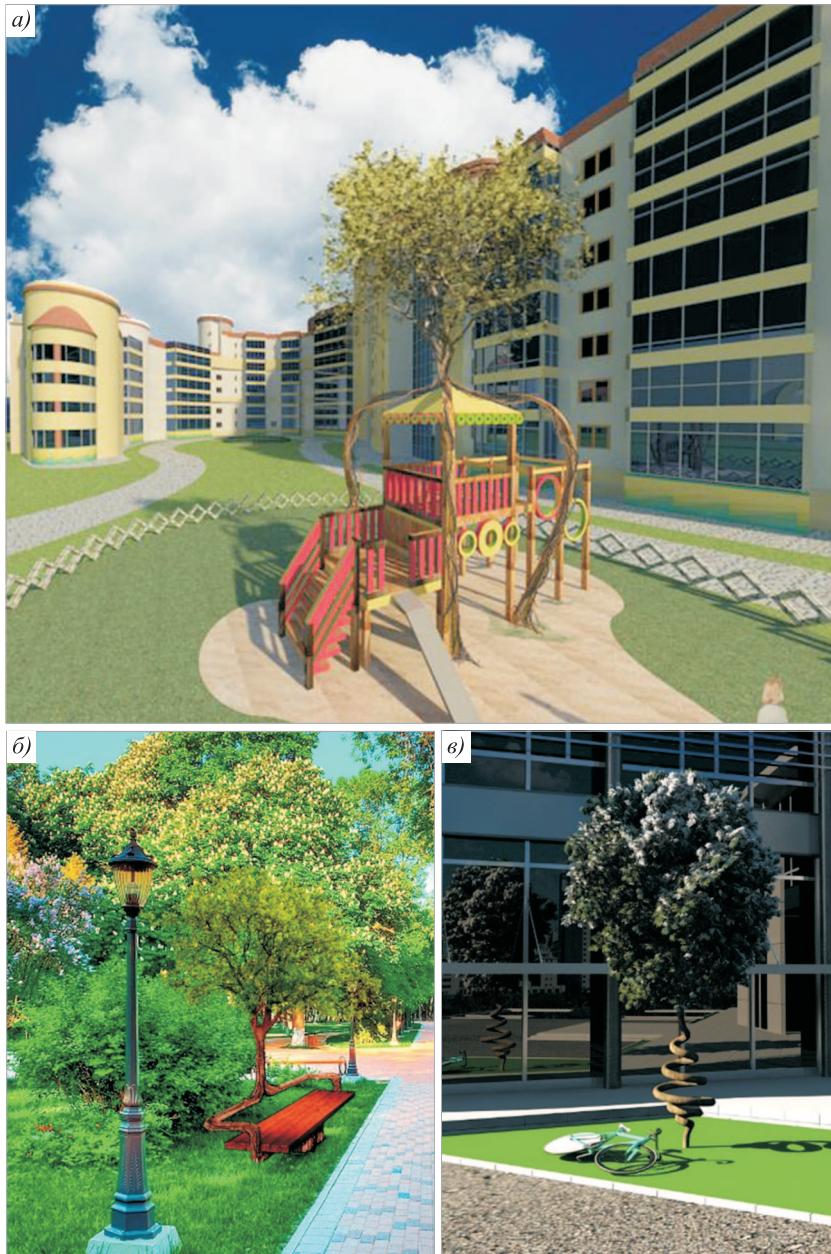


Рис. 2. Концептуальные проекты практического использования арборскульптурных объектов. Авторы: Овчинникова Виктория (а), Овчинников Денис (б), Тордокова Альбина (в) – студенты НГАСУ (Сибстрин)

ройства поспособствует улучшению экологической обстановки на микро-, мезо- и, в перспективе, на макроуровне. Пример применения объектов арборскульптуры приведен на рис. 2.

Разработанные научно-практические рекомендации для улучшения условий произрастания древесных растений в обязательном порядке распространяются и на арборскульптурные объекты, вследствие того что древесные растения, из которых формируется бионический объект, подвергаются еще

большему антропогенному воздействию. Рекомендуется объекты арборскульптуры «выращивать» на охраняемых территориях при наличии постоянного профессионального ухода и наблюдения.

Выводы. Для повышения экологической устойчивости городских территорий необходимо:

1. Создавать наиболее благоприятные условия для произрастания древесно-кустарниковых пород в городской среде с учетом следующих критерии:

– соответствие природно-климатических и архитектурно-планировочных данных местности данным экологического паспорта растений;

– группировки древесных растений на основании их аллелопатического взаимодействия;

– своевременный учет фитопатологических особенностей древесных растений, план трассировки инженерных сетей на территории застройки;

– анализ схемы вертикальной планировки территории на наличие пониженных рельефных мест, подверженных затоплению в пиковые периоды атмосферных осадков, с корректировкой предполагаемой посадки видового ассортимента древесно-кустарниковых пород согласно их требованию к влажности почвы, указанным в экологическом паспорте;

– планировочная организация древесно-кустарниковых пород с учетом их сохранности и защиты от вандализма, снегоуборочной техники, автомобилей;

– следование технологическим операциям (учитывая их периодичность за сезон) по уходу за посадками деревьев и кустарников.

2. Внедрять объекты арборскульптуры на территорию застройки в качестве бионических малых архитектурных форм и/или элементов городской среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мурашко О.О. Технические приемы формирования объектов арборскульптуры // Вестн. ТГАСУ. 2015. № 3. С. 34–45.
2. Дубровская О.С. Парки скульптур // Сборник тезисов МАРХИ. Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Наука, образование и экспериментальное проектирование». М., 2012. С. 35–40.
3. Курбатова А.С., Грибкова С.И. Создание устойчивой системы зеленых насаждений в городе: ландшафт., инженер., агротехн. приемы. М.: Маджента, 2006. 151 с.
4. Минкевич И.И., Дорофеева Т.Б., Kovazin V.F. Фитопатология. Болезни древесных и кустарниковых пород. СПб.: Лань, 2011. 158 с.
5. Чекалина Н.В., Белова Т.А., Будanova Л.А., Бerezuzkaya T.B. Экспериментальное изучение аллелопатических взаимовлияний на ранних стадиях развития растений // Материалы I междунар. науч.-практ. конф. Белгород, 2015. Ч. I. С. 120–122.
6. Болотов Н.А., Щеглов Д.И., Беляев А.Б. Инновационный подход к восстановлению лесов России // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Химия. Биология. Фармация. 2014. № 3. С. 92–101.
7. Авдотьин Л.Н., Лежава И.Г. Градостроительное проектирование. М.: Архитектура С, 2013. 589 с.

8. Gale B. The potential of living willow structures in the landscape. Title of dissertation. Master's thesis. State University of New York College of Environmental Science and Forestry Syracuse. New York, 2011. 54 p.
9. Мурashko О.О. Исторические тенденции ландшафтного дизайна – арборскульптура // Приволж. науч. журн. 2015. № 3. С. 178–183.

Смолина Олеся Олеговна, канд. архитектуры, ст. препод.;
E-mail: ZelenoeSt-vo@mail.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

Получено после доработки 25.10.17

Smolina Olesya Olegovna, PhD, Senior Lecturer; E-mail: ZelenoeSt-vo@mail.ru
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

WAYS TO IMPROVE THE SUSTAINABILITY OF URBAN TERRITORIES

The article suggested two ways to increase the environmental sustainability of urban areas. The first way: creating the most favorable conditions for the growth of plants, the second is the use of bionic small architectural forms – objects arborsculpture in the development territory. The first method aimed at competent design dendrological terms of land area, the gradual preparation which must be carried out taking into account the following aspects: ecological passports, allelopathy, phytopathology of woody plants, consolidated plan of engineering networks, the scheme of vertical planning of the territory, the planning structure and functional organization of the construction site. The main provisions of the first method of increasing the environmental sustainability of the territory included in the scientific-practical recommendations.

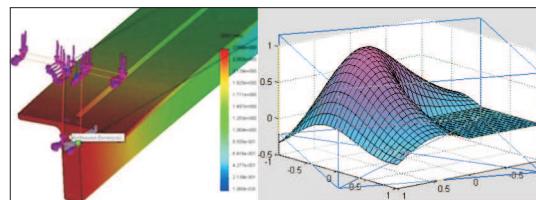
K e y w o r d s: environmental sustainability, landscaping, woody plants, arborsculpture, ecological passport, allelopathy.

REFERENCES

1. Murashko O.O. Tekhnicheskie priemy formirovaniya ob'ektov arborskul'ptury. [Technical methods of forming objects arborskulptury]. Vestnik TGASU [Herald of Tomsk State Architectural University]. 2015. No. 3. Pp. 34–45. (in Russian)
2. Dubrovskaya O.S. Parki skul'ptur [Parks sculptures]. Sbornik tezisov MARKhI. Materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf: «Nauka, obrazovanie i eksperimental'noe proektirovanie» [Abstracts of the Moscow architectural Institute. Materials of international scientific-practical conference «Science, education and experimental design»]. Moscow, 2012. Pp. 35–40. (in Russian)
3. Kurbatova A.S., Grubkova S.I. Sozdanie ustoychivoy sistemy zelenykh nasazhdeniy v gorode: landshaftnye, inzhenernye i agrotehnicheskie priemy [Establishing a sustainable system of green spaces in the city: landscape, engineering and agricultural practices]. Moscow, 2006. 151 p. (in Russian)
4. Minkevich I.I., Doroфеева T.B., Kovayazin V.F. Fitopatologiya. Bolezni drevesnykh i kustarnikovykh porod [Phytopathology. Disease of tree and shrub species]. Saint Petersburg, 2011. 158 p. (in Russian)
5. Chekalina N.V., Belova T.A., Budanova L.A., Berezutskaya T.V. Eksperimental'noe izuchenie allelopaticheskikh vzaimovliyanii na rannikh stadiyah razvitiya rasteniy [Experimental study of influenced early stages of plant development].

- Materialy I mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Proceedings of the I international scientific-practical conference]. Belgorod, 2015. P. I. Pp. 120–122. (in Russian)
6. B o l o t o v N.A., S h c h e g l o v D.I., B e l y a e v A.B. Innovatsionnyy podkhod k vosstanovleniyu lesov Rossii [Innovative approach to forest restoration Russia]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya. Khimiya. Biologiya. Farmatsiya [Vestnik of Voronezh State University. Ser. Chemistry. Biology. Pharmacy]. 2014. No. 3. Pp. 92–101. (in Russian)
7. A v d o t y i n L.N., L e z h a v a I.G. Gradostroitel'noe proektirovaniye [Urban design]. Moscow, 2013. 589 p. (in Russian)
8. G a l e B. The potential of living willow structures in the landscape. Title of dissertation. Master's thesis. State University of New York College of Environmental Science and Forestry Syracuse. New York, 2011. 54 p.
9. M u r a s h k o O.O. Istoricheskie tendentsii landshaftnogo dizayna – arborskul'ptura. [Historical trend analysis of landscape design – arborskulptura.]. Privolzhskiy nauchnyy zhurnal [Volga scientific journal]. 2015. No. 3. Pp. 178–183. (in Russian)
-

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



УДК 627.8:528.32

В.Ф. КАНУШИН, И.Г. ГАНАГИНА, Н.С. КОСАРЕВ, Д.Н. ГОЛДОБИН

К ВОПРОСУ О НЕОБХОДИМОСТИ УЧЕТА НЕПРИЛИВНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ПРИ ДЕФОРМАЦИОННОМ МОНИТОРИНГЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

В работе затронут вопрос о необходимости учета неприливных изменений силы тяжести при деформационном мониторинге гидротехнических сооружений. На конкретном инженерном объекте вычислены вариации потенциала и вариации нормальной высоты, обусловленные неприливными изменениями силы тяжести. В качестве тестового объекта, на котором проведены вычисления с помощью специально разработанного программного продукта, выступал Саяно-Шушенский гидроузел. Установлено, что изменения гравитационного поля, обусловленные колебанием уровня водных масс водохранилища, вносят существенные поправки в результаты геометрического нивелирования, достигая абсолютной величины, соизмеримой с точностью деформационного мониторинга гидротехнического сооружения, что ведет к необходимости выявления и корректного учета неприливных вариаций гравитационного поля при деформационном мониторинге гидротехнических сооружений.

Ключевые слова: деформационный мониторинг, гидротехнические сооружения, неприливные изменения силы тяжести.

Создание крупных гидротехнических сооружений (ГТС) приводит к сосредоточению за относительно короткий отрезок времени у плотины гидроэлектростанции огромных масс воды, которые могут достигать миллиардов кубических метров. Скопление таких масс требует постоянного контроля над состоянием как самой плотины, так и ее основания. В настоящее время контроль осуществляется геодезическими, геофизическими и геотехническими устройствами, объединенными зачастую в единую автоматизированную деформационную систему (АДС) [1–6]. Состав АДС зависит от многих факторов: специфики технологических характеристик объекта, его сложности, количества определяемых параметров, точности измерений и др. [7]. Классический контроль за ГТС проводится на основании многоцикловых высокоточных геодезических наблюдений, позволяющих получать информацию о текущем состоянии объекта в виде значений планово-высотных деформаций, смещений и отклонений от проектного или предыдущего его состояния [8].

© Канушин В.Ф., Ганагина И.Г., Косарев Н.С., Голдобин Д.Н., 2017

Результаты геодезических измерений подвержены не только ошибкам измерений, но и зависят от влияния внешних факторов. Особое место среди этих факторов занимают вариации гравитационного поля (ВГП), обусловленные изменением массы воды в водохранилище. Эти вариации силы тяжести не приводят к перемещениям в пространстве контрольных точек на гидротехническом сооружении и в его окрестностях, а лишь изменяют значения их отметок и координат [9]. Так как по изменению отметок и координат контрольных пунктов ГТС, получаемых из многоцикловых геодезических измерений, определяют основные деформационные характеристики сооружения, то возникает необходимость в исключении влияния ВГП, вызванного изменением массы воды в водохранилище между циклами геодезических измерений.

По оценкам, приведенным в работах^{1,2}, вариации силы тяжести, обусловленные изменением массы воды в водохранилище, могут достигать по абсолютной величине $(1-2) \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$, а нормальные высоты отметок точек могут составлять 1–15 мм, т.е. того же порядка, что и допустимая погрешность, которая определяется в соответствии с нормативной документацией (Гидротехнические сооружения ГЭС и ГАЭС. Правила эксплуатации. Нормы и требования. СТО РусГидро 02.01.80. 2012. 187 с.).

Для учета влияния ВГП на геодезические измерения предложено два способа. Первый основан на выполнении повторных гравиметрических наблюдений при разных уровнях воды. Однако по результатам повторных гравиметрических измерений не всегда и не везде в окрестности водохранилища можно с достаточной точностью вычислить поправки в геодезические измерения, обусловленные вариациями силы тяжести [10]. Второй способ предусматривает вычисление потенциала притяжения и его производных по известному объему, форме водной массы, заключенной между двумя уровнями водохранилища [11]. Так как объем и форма переменной водной массы известны, потенциал притяжения и его производные, вызванные этими массами, можно получить однозначно в любой точке P , имеющей координаты X, Y, Z , окрестности водохранилища с более высокой точностью и с меньшими затратами труда, чем при повторных гравиметрических измерениях.

Эти обстоятельства обуславливают необходимость разработки методов расчета неприливных вариаций потенциала притяжения и его первых производных с целью определения влияния изменений уровня воды в водохранилище на результаты геодезических измерений. Для решения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи: построить динамическую модель водных масс, разработать алгоритм и составить программу для вычисления значений потенциала и его производных, выпол-

¹ Исследование неприливных изменений силы тяжести и их влияние на геодезические измерения: Отчет о НИР (промежуточ.) / НИИГАиК; Рук. В.В. Бузук, И.Г. Вовк. № ГР 0285.0015698. Инв. № 02840022703. Новосибирск, 1984. 90 с.

² Разработка методики и оценка учета влияния вариаций силы тяжести, обусловленных изменением уровня водохранилища на результаты геодезических измерений: Отчет о НИР/СГГА; Рук. В.Ф. Канушин. № Гр 012003.00161. Инв. № 02.200303448. Новосибирск, 2003. 106 с.

нить оценку и учет влияния ВГП на результаты геометрического нивелирования.

Построение динамической модели водных масс. Авторами была введена декартова система координат $OXYZ$, в которой ось $0Y$ направлена вдоль плотины, ось $0X$ – в сторону верхнего бьефа, а ось $0Z$ – вниз по направлению отвесной линии (рис. 1).

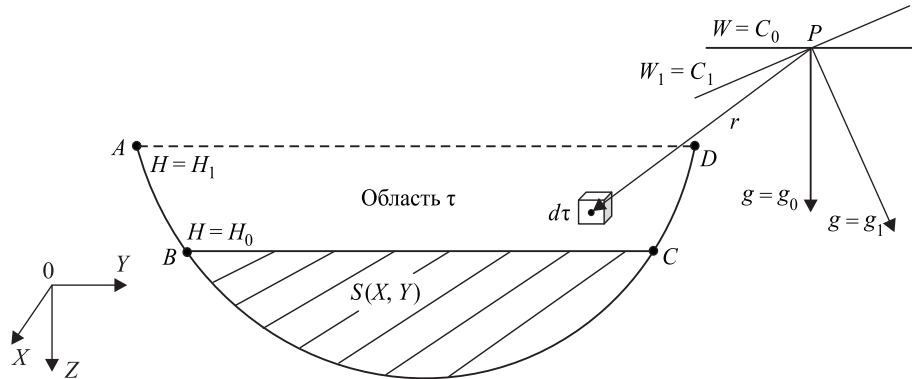


Рис. 1. Поперечный разрез водохранилища

P – точка физической поверхности Земли на берегу водохранилища

При уровне воды в водохранилище $H=H_0$ через точку $P(B, L, H')$ проходит уровенная поверхность потенциала силы тяжести $W(X_0, Y_0, Z_0) = C_0$, вектор нормали к этой поверхности равен $\bar{g}_0 = \{g_{X_0}, g_{Y_0}, g_{Z_0}\}$. Вследствие изменения уровня воды в водохранилище от отметки $H=H_0$ до отметки $H=H_1$ потенциал $W(X, Y, Z)$ изменяется на величину $V(P)$ и через точку P будет проходить уровенная поверхность

$$W_1(X, Y, Z) = C_1 = C_0 + V(P) \quad (1)$$

и вектор нормали к ней будет равен $\bar{g}_1 = \{g_{X_1}, g_{Y_1}, g_{Z_1}\}$.

Изменение координат точки $P(B, L, H')$ при колебании уровня воды описывается следующими формулами:

$$\begin{aligned} \Delta B &= -\frac{g_{X_1} - g_{X_0}}{\gamma(P)} = -\frac{V_X(P)}{\gamma(P)}, & \Delta L &= -\frac{g_{Y_1} - g_{Y_0}}{\gamma(P)} = -\frac{V_Y(P)}{\gamma(P)}, \\ \Delta H' &= \frac{C_1 - C_0}{\gamma(P)} = -\frac{V(P)}{\gamma(P)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\gamma(P)$ – нормальное значение силы тяжести в точке $P(B, L, H')$.

Таким образом, для оценки изменения координат B, L, H' необходимо знать вариации гравитационного поля и его первых производных по координатам V_X, V_Y, V_Z . Их значения оцениваются по формулам^{1,2}:

$$V(P) = f \delta \iiint_{\tau} \frac{d\tau}{r^3}, \quad V_x(P) = f \delta \iiint_{\tau} \frac{X - X_P}{r^3} d\tau, \quad V_y(P) = f \delta \iiint_{\tau} \frac{Y - Y_P}{r^3} d\tau,$$

$$V_z(P) = f \delta \iiint_{\tau} \frac{Z - Z_P}{r^3} d\tau, \quad (3)$$

где τ – область $ABCD$, где находятся аномальные массы воды;
 $\Delta X_P, \Delta Y_P, \Delta Z_P$ – координаты результативной точки P , в которой оцениваются вариации силы тяжести;
 r – расстояние от результативной точки P до текущей точки в объеме τ ;
 δ – плотность воды, равная $1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$.

Для вычисления интегралов в формулах (3) необходимо знать поверхность σ , ограничивающую область τ . Так как простое аналитическое выражение для ее описания в формулах (3) обычно найти не удается, то для вычисления ВГП и его характеристик возмущающие массы воды, заключенные в соответствующей области τ , аппроксимируются математической моделью, состоящей из однородных элементарных прямоугольных параллелепипедов.

Очевидно, что чем меньше размеры элементарных параллелепипедов $\Delta\tau_i$, тем точнее будет аппроксимация объема. Однако беспредельное уменьшение размеров $\Delta\tau_i$ влечет за собой неограниченное увеличение числа слагаемых в формулах и затрудняет экспериментальные исследования. Для решения этой проблемы авторами предлагается использовать интервальную оценку точности аппроксимации, которая заключается в уменьшении размера элементарного параллелепипеда $\Delta\tau_i$ до тех пор, пока разность двух последовательных приближений не будет превышать выбранного критерия точности ε

$$\varepsilon(V) \leq |V_i - V_{i-1}|. \quad (4)$$

Изложенный метод является трудозатратным, требующим многократной обработки большого объема исходной информации. Для уменьшения объема вычислений при решении этой задачи объем водохранилища был разделен на две области: τ_1 – центральная и τ_2 – береговая область водоема. Центральная область τ_1 аппроксимируется системой постоянных элементарных параллелепипедов с размером стороны основания, выбранным в зависимости от характера рельефа дна водоема так, чтобы выполнялось условие (4).

Программное обеспечение для расчета гравитационного эффекта, обусловленного изменениями масс воды в водохранилище. Для расчета гравитационного эффекта, возникающего вследствие изменения масс воды в водохранилище, авторами была разработана компьютерная программа ВГП.

В комплект программы ВГП входят два файла: S_SH.EXE – исполняемый и SSH.DDD – файл, содержащий цифровую модель приплотинной области водохранилища. Файл (SSH.DDD) строят методом аппроксимации объема водохранилища системой элементарных непересекающихся параллелепипедов $\Delta\tau_i$, грани которых параллельны координатным плоскостям^{1, 2}.

Исходная цифровая модель не содержит информации об изменении уровня водохранилища. Она добавлялась в программу для каждой точки от-

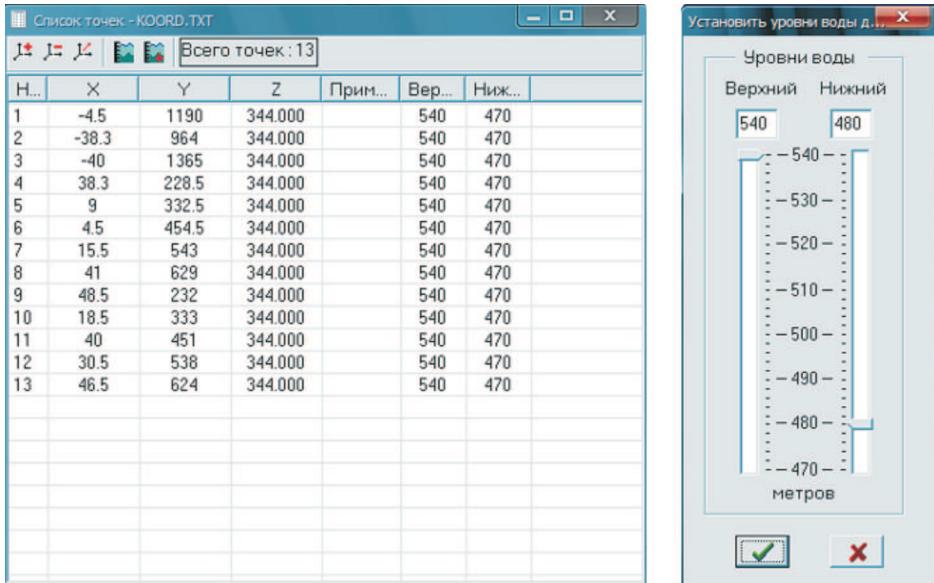


Рис. 2. Входные данные для обработки в программе ВГП

дельно. При открытии исходного списка возможно только изменение уровня воды, устанавливаемого для каждой точки. На рис. 2 показаны входные данные для обработки в программе.

Вариации потенциала силы тяжести и нормальных высот для реперов высотной сети Саяно-Шушенского гидроузла при изменении уровня водохранилища на 70 м

Репер	ΔW , мГал	$\Delta H'$, мм	Репер	ΔW , мГал	$\Delta H'$, мм	Репер	ΔW , мГал	$\Delta H'$, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	96,604	0,986	16	124,175	1,267	31	107,895	1,101
2	106,318	1,085	17	123,712	1,262	32	97,374	0,994
3	76,277	0,778	18	95,782	0,977	33	72,996	0,745
4	96,381	0,983	19	111,486	1,138	34	72,660	0,741
5	119,249	1,217	20	91,730	0,936	35	72,985	0,745
6	121,874	1,244	21	117,618	1,200	36	76,429	0,780
7	158,746	1,620	22	121,386	1,239	37	107,064	1,092
8	93,514	0,954	23	124,926	1,275	38	106,207	1,084
9	115,860	1,182	24	131,109	1,338	39	78,119	0,797
10	125,408	1,280	25	153,806	1,569	40	77,340	0,789
11	132,527	1,352	26	141,696	1,446	41	77,427	0,790
12	70,297	0,717	27	183,827	1,876	42	95,785	0,977
13	106,202	1,084	28	184,066	1,878			
14	111,448	1,137	29	103,485	1,056			
15	124,113	1,266	30	203,029	2,072			

Оценка и учет влияния вариации гравитационного поля на результаты геометрического нивелирования. В работе [11] авторами была разработана методика учета влияния вариации гравитационного поля на результаты геометрического нивелирования, которая заключается в учете поправки в элементарное превышение, обусловленной изменением уровня водохранилища.

На примере высотной сети Саяно-Шушенского гидроузла, состоящего из кустов исходных и опорных реперов, рабочих реперов в верхнем и нижнем бьефах, осадочных марок в плотине и глубинных реперов в основании, рассчитаем поправку в элементарное превышение, вызванное изменением уровня водохранилища.

В таблице приведены результаты вычислений, полученные с помощью созданного программного продукта ВГП вариаций потенциала ΔW и вариаций нормальной высоты $\Delta H'$, для 42 реперов высотной сети в нижнем бьефе Саяно-Шушенского гидроузла при изменении уровня водохранилища от отметки 470 м до отметки 540 м.

Из таблицы видно, что вариации нормальных высот достигли максимального значения, равного 2,07 мм, на репере 30, а минимального значения, равного 0,71 мм, на репере 12, что говорит о необходимости учета неприливных изменений силы тяжести при деформационном мониторинге гидротехнических сооружений.

На рис. 3 приведена картосхема поправок в нормальные высоты за влияние вариаций гравитационного поля, обусловленного изменением уровня водохранилища на 70 м.

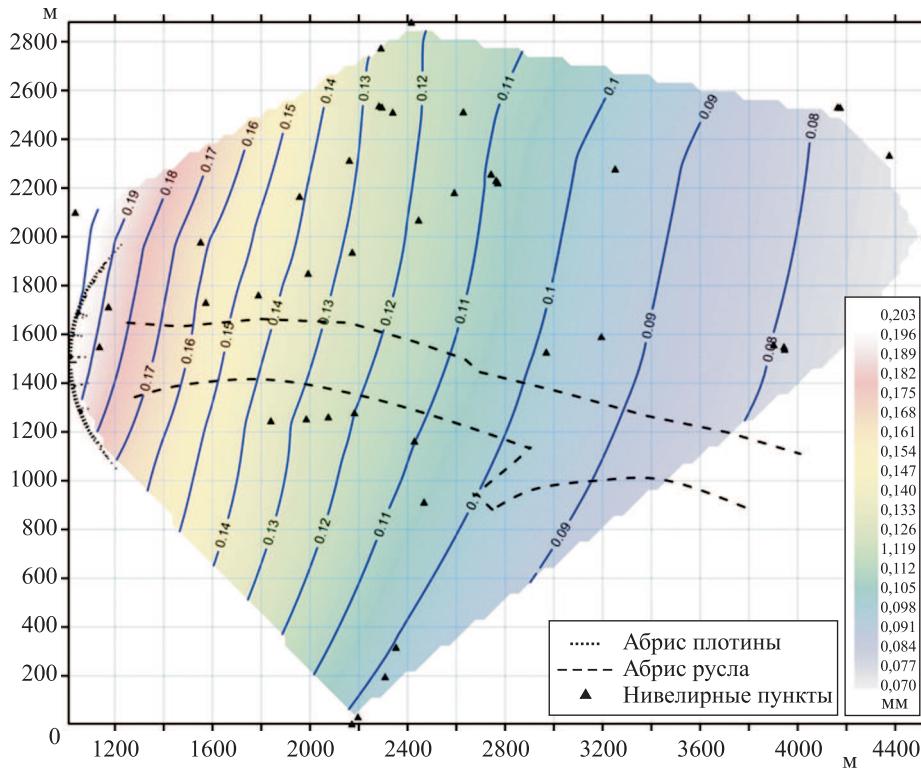


Рис. 3. Картосхема поправок в нормальные высоты за влияние вариаций гравитационного поля, обусловленного изменением уровня водохранилища на 70 м

Из рис. 3 визуально видно, как изменяется величина поправок в нормальные высоты при изменении уровня водохранилища на 70 м.

Выводы. Изменения гравитационного поля, вызванные колебанием уровня водных масс водохранилища, вносят существенные поправки в результаты геометрического нивелирования, достигая абсолютной величины, соизмеримой с точностью деформационного мониторинга гидротехнического сооружения, что ведет к необходимости выявления и корректного учета неприливных вариаций гравитационного поля при деформационном мониторинге гидротехнических сооружений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гарифин П.А., Марлей В.Е., Ольховик Е.О., Шабанов С.В. Разработка автоматизированной системы для непрерывного контроля технического состояния гидротехнических сооружений // Гидротехника. XXI век. 2013. № 2. С. 50–53.
2. Ustinov A.V., Tveritin A.L. Procedure for control survey of water-development works with use of ground laser scanning // Power technology and engineering. 2014. Vol. 48, No. 1. P. 13–16.
3. Ogaja C., Li X., Rizos C. Advances in structural monitoring with global positioning system technology // Journal of Applied Geodesy. 2007. Vol. 1, No. 3. Р. 171–179.
4. Гарифин П.А., Ольховик Е.О., Шабанов С.В. Методология организации непрерывного мониторинга технического состояния ГТС водного транспорта // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 2. С. 58–72.
5. Van der Linden G.W. et al. Optimal sensor placement for health monitoring of civil structures // American Control Conference (ACC), 2011. IEEE, 2011. Р. 3116–3121.
6. Олейник А.Ю., Макшанов А.В., Марлей В.Е. Разработка системы мониторинга деформаций гидротехнических сооружений на основе интернет-технологий и микроконтроллеров // Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. адмирала С.О. Макарова. 2015. № 1. С. 215–222.
7. Хиллер Б., Ямбаев Х.К. Разработка и натурные испытания автоматизированной системы деформационного мониторинга // Вестн. СГУГиТ. 2016. Вып. 1. С. 48–61.
8. Хорошилов В.С., Кобелева Н.Н., Губонин П.Н. Математическое моделирование деформационного процесса для изучения перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС на основе динамической модели (2004–2007 гг.) // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 2. С. 49–58.
9. Канущин В.Ф. и др. Оценка гравитационного влияния изменения массы водохранилища на результаты наблюдений за деформациями основных сооружений Саяно-Шушенской ГЭС // Вестн. СГГА. 2003. № 7. С. 44–46.
10. Огородова Л.В., Шимбиров Б.П., Юзевович А.П. Гравиметрия. М.: Недра, 1978. 226 с.
11. Канущин В.Ф. и др. Оценка и учет влияния изменения силы тяжести на результаты геометрического нивелирования в нижнем бьефе Саяно-Шушенской ГЭС // Современные проблемы геодезии и оптики: ЛIII междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию СГГА, 11–21 марта 2003 г. Новосибирск: СГГА, 2003. Ч. 3. С. 228.

Канушин Вадим Федорович, канд. техн. наук, доц.

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск

Ганагина Ирина Геннадьевна, канд. техн. наук, доц.

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск

Косарев Николай Сергеевич, канд. техн. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск

Голдобин Денис Николаевич, инж.

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск

Получено 25.10.17

Kanushin Vadim Fedorovich, PhD, Ass. Professor

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

Ganagina Irina Gennadievna, PhD, Ass. Professor

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

Kosarev Nikolay Sergeevich, PhD, Ass. Professor

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

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

Goldobin Denis Nikolaevich, Engineer

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

TO THE NEED ACCOUNTING TIDAL GRAVITY CHANGE DURING DEFORMATION MONITORING OF HYDRAULIC STRUCTURES

In this paper, the issue of the necessity of taking into account non-tidal changes in gravity during the deformation monitoring of hydraulic structures was touched upon. On a concrete engineering object, the results of calculating variations in the potential and variations in the normal height, caused by non-tidal variations in gravity, are presented. As such a test object, on which the results of calculations with the help of a specially developed software product were performed, the Sayano-Shushensky hydro-power unit performed. According to the results of the calculation, it is established that changes in the gravitational field caused by fluctuations in the level of the water masses of the reservoir make significant corrections to the results of geometric leveling, reaching an absolute value commensurate with the accuracy of the deformation monitoring of the hydraulic structure, which leads to the need to identify and correctly account for non-tidal variations of the gravitational field at deformation monitoring of hydraulic structures.

Key words: deformation monitoring, hydraulic structures, tidal gravity.

REFERENCES

1. Garibin P.A., Marley V.E., O'khovik E.O., Shabanova S.V. Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy dlya nepreryvnogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Development of an automated system for continuous monitoring of the technical condition of hydraulic structure]. Gidrotekhnika. XXI vek [Hydraulic engineering the XXI century]. 2013. No. 2. Pp. 50–53. (in Russian)
2. Ustinov A.V., Tveritin A.L. Procedure for control survey of water-development works with use of ground laser scanning. Power technology and engineering. 2014. Vol. 48, No. 1. Pp. 13–16.

3. Ogaja C., Li X., Rizos C. Advances in structural monitoring with global positioning system technology. *Journal of Applied Geodesy*. 2007. Vol. 1, No. 3. Pp. 171–179.
4. Garibin P.A., O1'khovik E.O., Shabarov S.V. Metodologiya organizatsii nepreryvnogo monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya GTS vodnogo transporta [The methodology of organization of continuous monitoring of technical state of hydraulic structures of water transport]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No. 2. Pp. 58–72. (in Russian)
5. Van der Linden G.W. et al. Optimal sensor placement for health monitoring of civil structures. *American Control Conference (ACC)*, 2011. IEEE, 2011. Pp. 3116–3121.
6. Oleynik A.Yu., Maksharov A.V., Marley V.E. Razrabotka sistemy monitoringa deformatsiy gidrotekhnicheskikh sooruzheniy na osnove internet-tehnologiy i mikrokontrollerov [Development monitoring system strain engineering at the web-based and microcontrollers]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni S.O. Makarova* [Vestnik Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping]. 2015. No. 1. Pp. 215–222. (in Russian)
7. Hiller B., Yambaev Kh.K. Razrabotka i naturnye ispytaniya avtomatizirovannoy sistemy deformatsionnogo monitoringa [Development and natural tests of automated systems of deformation monitoring]. *Vestnik SGUGiT* [Vestnik SSUGiT]. 2016. Vol. 1. Pp. 48–61. (in Russian)
8. Khoroshilov V.S., Kobelleva N.N., Gubonin P.N. Matematicheskoe modelirovanie deformatsionnogo protsessa dlya izucheniya peremeshcheniy plotiny Sayano-Shushenskoy GES na osnove dinamicheskoy modeli (2004–2007 gg.) [Creation of expected mathematical model for studying of process of movements of a dam of Sayano-Shushenskaya hydroelectric power station on the basis of dynamic model (2004–2007)]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 2. Pp. 49–58. (in Russian)
9. Kanushin V.F. et al. Otsenka gravitatsionnogo vliyaniya izmeneniya massy vodokhranilishcha na resul'taty nablyudeniy za deformatsiyami osnovnykh sooruzheniy Sayano-Shushenskoy GES [Evaluation of the gravitational influence of the change of the reservoir mass on the results of observations over deformations of the main structures of Sayano-Shushenskaya HPP]. *Vestnik SGGA* [Vestnik SSUGiT]. 2003. No. 7. Pp. 44–46. (in Russian)
10. Ogorodova L.V., Shimbirev B.P., Yuzefovich A.P. *Gravimetriya* [Gravimetry]. Moscow, Nedra, 1978. 226 p. (in Russian)
11. Kanushin V.F. et al. Otsenka i uchet vliyaniya izmeneniya sily tyazhesti na resul'taty geometricheskogo nivelirovaniya v nizhnem b'efe Sayano-Shushenskoy GES [Evaluation and consideration of the effect of the change in gravity on the results of geometric leveling in the lower tail of the Sayano-Shushenskaya HPP]. Sovremennye problemy geodezii i optiki [Modern problems of geodesy and optic]. Novosibirsk, SSGA [SSAG], 2003. Vol. 3. P. 228. (in Russian)

УДК 624.07

С.А. МАКЕЕВ, Ю.В. КРАСНОЩЕКОВ, З.Н. СОКОЛОВСКИЙ

**ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА АНАЛИЗА
ПРОСТРАНСТВЕННОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ
УПРУГИХ ПРЯМЫХ СТЕРЖНЕЙ
С УЧЕТОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ**

Представлены результаты реализации в общедоступном табличном процессоре MS Excel методики интегрирования системы двенадцати дифференциальных уравнений напряженно-деформированного состояния, описывающей пространственное поведение упругого стержня в геометрически нелинейной постановке методом Эйлера (метод Рунге–Кутты первого порядка). Конечно-разностная форма представления полученной системы уравнений позволила в общедоступном табличном процессоре MS Excel реализовать алгоритм численного интегрирования этой системы с автоматизированным определением начальных параметров, доставляющих требуемые граничные условия на другом конце стержня с помощью встроенной процедуры «Поиск решения». Это позволяет проектировщику без привлечения специализированных программных комплексов оперативно определять критические нагрузки сжатых и изгибаемых стержневых элементов, анализировать поведение стержней при нагрузках, превышающих критические по Эйлеру–Лагранжу, как при потере общей продольной устойчивости, так и при потере устойчивости из плоскости при изгибе. Приведены результаты численных и экспериментальных тестирований двух частных задач пространственного поведения упругих стержней с доведением до потери плоской формы устойчивости и анализом посткритического деформирования элементов с реализацией начала одной из двух симметричных ветвей трезубца бифуркации. При нагрузках, превышающих критические по Эйлеру на 25 %, рассчитанные по предложенной методике значения максимальных прогибов и углов поворота сечений стержней отличались от экспериментальных значений не более чем на 8 %.

Ключевые слова: пространственное деформирование, общая продольная устойчивость стержня, потеря устойчивости плоской формы деформирования, критическая нагрузка, посткритичекое поведение, геометрическая нелинейность.

Введение. Действующие строительные правила СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» предписывают рассчитывать стальные пространственные конструкции с учетом геометрической и физической нелинейности (п. 4.2.5)¹. В рамках данной работы ограничимся геометрической нелинейностью.

В многочисленных исследованиях, в том числе фундаментальных, построены математические модели пространственного деформирования стержней в геометрически линейной и нелинейной постановке. При этом в линейной постановке для частных случаев найдены решения систем в аналитическом виде с определением критических нагрузок [1–3]. Более общие

¹ СП 16.13330.2017. Стальные конструкции / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова и др. М.: ОАО «ЦПП», 2017. 176 с.

стержневые системы даже в линейной постановке не имеют решений в квадратурах и требуют применения специальных методов с привлечением численных алгоритмов [4–8].

Учет геометрической нелинейности в моделях «в больших перемещениях» позволяет исследовать поведение стержневых систем при нагрузках, превышающих первые критические по Эйлеру–Лагранжу, как при решении задач общей продольной устойчивости, так и при рассмотрении потери устойчивости плоской формы изгиба элемента. Нелинейные модели напряженно-деформированного состояния в области закритического нагружения по Эйлеру–Лагранжу также не имеют решений в квадратурах и требуют применения методик численного интегрирования с использованием современных вычислительных комплексов [9, 10].

Представляем математическую модель пространственного деформирования упругого стержня в геометрически нелинейной постановке (учет больших перемещений) и результаты интегрирования данной системы в общедоступном табличном процессоре MS Excel в области до- и посткритических нагрузок методом Эйлера (метод Рунге–Кутты первого порядка) [11, 12].

Математическая модель. Используя классические знания механики деформируемого твердого тела, рассмотрим модель косого изгиба с растяжением и кручением упругого прямого стержня на базе технической теории стержней в геометрически нелинейной постановке, приняв, в первом приближении, гипотезу плоских сечений.

Примем в качестве внутренних силовых параметров силы N , Q_x , Q_y и моменты M_x , M_y , M_z в неподвижной правой системе координат xuz . Распределенные по длине внешние две поперечные, продольная силы и распределенный крутящий момент q_x , q_y , q_z , m_z представим приведенными к оси недеформированного стержня также в неподвижной системе. Перемещения оси элемента в неподвижной правой системе координат обозначим вдоль оси $x u$, оси $y v$ и оси $z w$, а проекции углов поворота сечений на координатные плоскости соответственно Φ_x , Φ_y , Φ_z .

Схема сил, моментов, перемещений и углов поворота бесконечно малого элемента стержня dz до и после деформации представлена на рис. 1.

Используя основные положения работ [1–3], запишем шесть уравнений равновесия в следующем виде:

$$\frac{dN}{dz} = -q_z, \quad \frac{dQ_y}{dz} = -q_y, \quad \frac{dQ_x}{dz} = -q_x, \quad (1)$$

$$\frac{dM_x}{dz_x} = Q_y \cos \varphi_x + N \sin \varphi_x, \quad (2)$$

$$\frac{dM_y}{dz_y} = -Q_x \cos \varphi_y + N \sin \varphi_y, \quad (3)$$

$$\frac{dM_z}{dz} = -m_z - Q_y \sin \varphi_y \frac{dz_y}{dz} - Q_x \sin \varphi_x \frac{dz_x}{dz}, \quad (4)$$

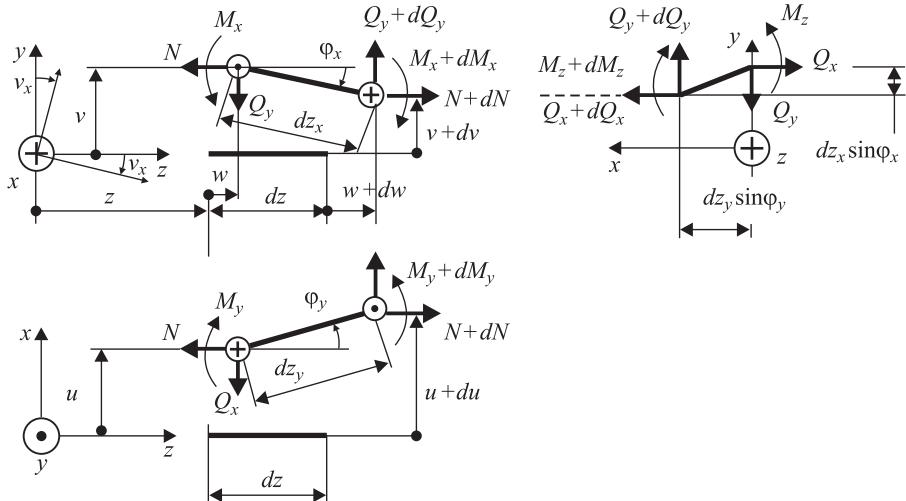


Рис. 1. Пространственная схема равновесия элемента стержня

где dz_x , dz_y – проекции деформированного элемента на плоскости yoz и xoz соответственно.

Далее запишем геометрические соотношения:

$$\frac{dv}{dz_x} = -\sin \varphi_x, \quad \frac{du}{dz_y} = \sin \varphi_y, \quad \frac{dw}{dz} = \frac{dz_x}{dz} \cos \varphi_x - 1. \quad (5)$$

Для получения физических уравнений и дополнительных разрешающих геометрических соотношений рассмотрим схему перехода к подвижным осям по аналогии с [3].

Пусть переход осуществляется последовательными тремя поворотами осей на положительные углы ν_x , ν_y , ν_z . На рис. 1, в качестве примера, показан первый последовательный угол поворота системы координат v_x относительно оси x .

При этом направляющие косинусы подвижных осей будут:

$$\begin{aligned} l_x &= \cos \nu_z \cos \nu_y, \quad m_x = \sin \nu_z, \quad n_x = -\sin \nu_y; \\ l_y &= \sin \nu_x \sin \nu_y \cos \nu_z - \cos \nu_x \sin \nu_z, \quad m_y = -\sin \nu_x \sin \nu_y \sin \nu_z + \cos \nu_x \cos \nu_z, \\ n_y &= \sin \nu_x \cos \nu_y; \quad l_z = \cos \nu_x \sin \nu_y \cos \nu_z + \sin \nu_x \sin \nu_z, \\ m_z &= \cos \nu_x \sin \nu_y \sin \nu_z - \cos \nu_y \sin \nu_x, \quad n_z = \cos \nu_x \cos \nu_y. \end{aligned} \quad (6)$$

Выразим φ_x , φ_y и φ_z через неизвестные углы поворота:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_x &= -\frac{m_z}{n_z}, \quad \text{т.е. } \varphi_x = -\operatorname{arctg} \frac{m_z}{n_z}; \\ \operatorname{tg} \varphi_y &= \frac{l_z}{n_z}, \quad \text{т.е. } \varphi_y = \operatorname{arctg} \frac{l_z}{n_z}; \\ \operatorname{tg} \varphi_z &= -\frac{l_y}{m_y}, \quad \text{т.е. } \varphi_z = -\operatorname{arctg} \frac{l_y}{m_y}. \end{aligned} \quad (7)$$

Длину элемента dz продольной оси в деформированном состоянии $[dz]$ после нагружения (поворота и растяжения) представим в виде:

$$[dz] = \left(1 + \frac{Q_x l_z + Q_y m_z + N n_z}{EA} \right) dz,$$

при этом его проекция на ось oz

$$[dz]n_z,$$

проекция на плоскость yoz

$$dz_x = \frac{[dz]n_z}{\cos\phi_x},$$

проекция на плоскость xoz

$$dz_y = \frac{[dz]n_z}{\cos\phi_y}.$$

После подстановки последних выражений в уравнения равновесия и геометрические соотношения система уравнений содержит 12 параметров ($N, Q_x, Q_y, M_x, M_y, M_z, \phi_x, \phi_y, \phi_z, v, w, u$), т.е. требуется еще три уравнения. Получим их.

Относительное удлинение волокна $\varepsilon(x, y)$ равно относительному удлинению проекции отрезка оси на координатные плоскости. Следовательно, имеем

$$\varepsilon(x, y) = y \frac{dv_x}{dz_x} - x \frac{dv_y}{dz_y}.$$

С учетом закона Гука после нагружения изгибающие моменты в сечении:

$$M_x l_x + M_y m_x + M_z n_x = E \iint_F y \varepsilon(x, y) dx dy = E J_x \frac{dv_x}{dz_x},$$

$$M_x l_y + M_y m_y + M_z n_y = -E \iint_F x \varepsilon(x, y) dx dy = E J_y \frac{dv_y}{dz_y}.$$

После алгебраических преобразований получаем выражения:

$$\frac{dv_x}{dz_x} = \frac{M_x l_x + M_y m_x + M_z n_x}{E J_x}, \quad (8)$$

$$\frac{dv_y}{dz_y} = \frac{M_x l_y + M_y m_y + M_z n_y}{E J_y}. \quad (9)$$

В соответствии с известными приближенными зависимостями при кручении некруглых стержней

$$\frac{dv_z}{dz} \approx \frac{M_x l_z + M_y m_z + M_z n_z}{k_p G (J_X + J_Y)}, \quad (10)$$

где k_p – коэффициент вычисления полярного момента инерции для различных сечений, определяемый экспериментально или на основе метода мембранный аналогии.

Система двенадцати нелинейных дифференциальных уравнений (1–5), (8–10) применима для оценки критических нагрузок и исследования поведения прямых упругих стержней после потери продольной устойчивости или плоской формы изгиба.

Авторами разработан алгоритм и реализованный в общедоступном табличном процессоре MS Excel программный комплекс, позволяющий интегрировать полученную систему двенадцати дифференциальных уравнений методом Эйлера (метод Рунге–Кутты первого порядка) в до- и посткритических областях нагрузок. Уравнения полученной системы двенадцати уравнений первого порядка записываются в разностном виде [11, 12]. Ниже показан пример записи в разностном виде первого уравнения равновесия:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dz} &= -q_z, \quad \frac{N(i+1)-N(i)}{\Delta z} = -q(i)_z, \\ \frac{N(i+1)-N(i)}{\Delta z} &= -q(i)_z, \\ N(i+1)-N(i) &= -q(i)_z \Delta z, \\ N(i+1) &= N(i) - q(i)_z \Delta z, \end{aligned} \tag{11}$$

где i – номер шага интегрирования. Значения i изменяются в процессе интегрирования от 0 до $n = 100–500$ в зависимости от точности решения, здесь n – число шагов интегрирования по длине элемента L ;

$\Delta z = L/n$ – шаг интегрирования.

Фрагмент листа программного комплекса с показом записи выражения продольной силы в разностном виде (11) представлен на рис. 2.

Сходимость решения обеспечивается поиском начальных параметров системы встроенной процедурой «Поиск решения», удовлетворяющих требуемым граничным условиям на другом конце элемента.

Для примера сформулируем систему граничных условий для задачи консольного стержня:

- известные начальные параметры $\varphi_x(0) = 0, \varphi_y(0) = 0, \varphi_z(0) = 0, v(0) = 0, w(0) = 0, u(0) = 0$;
- неизвестные начальные параметры (определяются с помощью процедуры «Поиск решения») $M_x(0), M_y(0), M_z(0), N(0), Q_x(0), Q_y(0)$ (изменяемые ячейки, рис. 3);

– требуемые граничные условия на правом конце стержня $M_x(L) = 0, M_y(L) = 0, M_z(L) = 0, N(L) = 0, Q_x(L) = 0, Q_y(L) = -P$ (целевая ячейка и ограничения, см. рис. 3).

При заданных расчетчиком шести значениях первого приближения неизвестных начальных параметров процедура «Поиск решения», варьируя значениями в этих ячейках, находит значения, каждый раз интегрируя систему двенадцати разностных уравнений от $i = 0$ (начало стержня) до $i = n$ (конец стержня), доставляющие выполнение требуемых граничных условий на правом конце стержня (см. рис. 2, 3).

ТАБЛИЦА РАСЧЕТОВ											
31	А	Б	В	С	Д	Е	Ф	Г	Н	И	Ж
32	Л	з, мм	QX, Н/мм	QY, Н/мм	QZ, Н/мм	Rx, Н	Ry, Н	Rz, Н	Mx, Нм	My, Нм	Mz, Нм
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	1	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0
35	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	4	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0
38	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 2. Фрагмент листа программного комплекса



Рис. 3. Параметры процедуры «Поиск решения»

Таким образом, расчетчик задает начальное значение нагрузки (заведомо ниже значения критической нагрузки) и находит в автоматическом режиме решение с получением всех внутренних сил, перемещений и углов поворота сечений с графическим представлением результатов. Далее, задав произвольный шаг приращения нагрузки, производится приближение к критическому значению. При приближении к значению критической нагрузки следует следить за приращением шага. В случае срыва решения нужно вернуться на предыдущий уровень нагрузки и уменьшить шаг. В таком режиме проходят критическое состояние (стадию бифуркации), определяя направление деформаций после потери устойчивости приложением бесконечно малой нагрузки, например, в направлении оси x с плюсом или с минусом.

Численное и экспериментальное тестирование модели. Ниже приведены результаты численного решения в разработанном программном комплексе MS Excel двух тестовых задач о поведении тонкостенного упругого прямого стального стержня с размерами $360 \times 19,6 \times 1$ мм в критической области с выходом сечений из плоскости:

- при моментном нагружении (рис. 4, $M_{kp} = \pi \sqrt{EJ_y G J_d} / L = 3628$ Н · мм [2]);
- при нагружении сосредоточенной силой по консольной схеме (рис. 5, $P_{kp} = 4,01 \sqrt{EJ_y G J_d} / L^2 = 12,86$ Н [2]).

Система дифференциальных уравнений интегрировалась методом Эйлера при последовательном повышении нагрузки. После прохождения критических нагрузок наблюдается нелинейное конечное увеличение расчетных параметров, что соответствует реальному поведению упругих стержней.

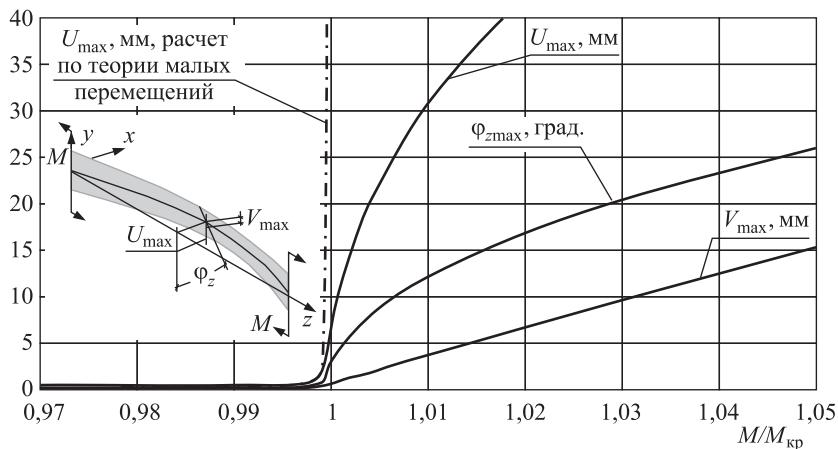


Рис. 4. Эпюры прогибов и углов поворота сечения в середине пролета при моментном нагружении стержня

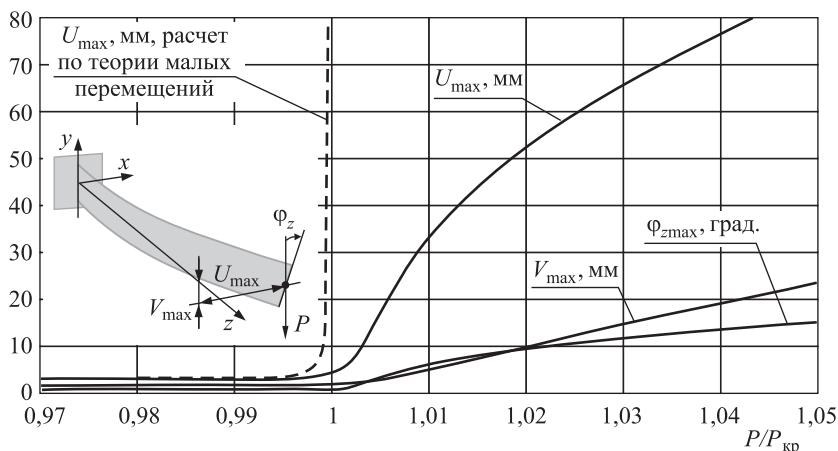


Рис. 5. Эпюры прогибов и углов поворота торцевого сечения при нагружении стержня по консольной схеме



Рис. 6. Вид на нагруженный экспериментальный образец

Для проверки адекватности предложенной модели проводился эксперимент по консольному нагружению стального (инструментальная сталь) стержня с размерами $600 \times 51 \times 1,18$ мм по схеме на рис. 6. При этом зафиксирована потеря плоской формы при нагрузке $19,6$ Н ($P_{\text{кр}} = 4,01 \sqrt{EJ_y G J_d} / L^2 = 19,8$ Н [1]).

Экспериментальные данные и соответствующие данные численного интегрирования при нагрузках, превышающих критическую силу, приведены в таблице.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных для консольного стержня ($600 \times 51 \times 1,18$ мм)

P , Н	V_{max} , мм			U_{max} , мм			$\varphi_{z\text{max}}$, град.		
	эксперимент	расчет	%	эксперимент	расчет	%	эксперимент	расчет	%
20,3	-23	-21,3	7,4	98	95,6	2,4	-12	-11,3	5,8
25,0	-139	-132,7	4,5	263	252,3	4,1	-29	-28	6,9

Сравнение экспериментальных данных с расчетными показало достаточную для инженерных вычислений точность.

В дальнейшем, для определения области адекватности предполагается провести комплексное экспериментальное исследование разработанной модели интегрирования.

Заключение. Предложенный алгоритм, реализованный в общедоступном табличном процессоре MS Excel, позволяет проектировщику без привлечения дорогостоящих программных комплексов оперативно производить исследование поведения упругого стержневого элемента при пространственном загружении с поиском критических нагрузок общей продольной устойчивости или устойчивости плоской формы изгиба и анализом деформаций в посткритической по Эйлеру–Лагранжу области загружения.

Представленный подход имеет все предпосылки для учета депланации сечения и физической нелинейности материала с выходом на моделирование живучести как плоских, так и пространственных стержневых конструкций с учетом реальных дефектов – местные и общие прогибы оси стержней, дефекты и повреждения полок и стенок составляющих элементов, вырезы и отверстия с учетом реальных очертаний и местоположений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. М.: ГИФ-МЛ, 1959. 566 с.
2. Тимошенко С.П. Устойчивость упругих систем. М.: Гостехиздат, 1955. 465 с.
3. Светлицкий В.А. Механика стержней: Учеб. для вузов. В 2 ч. Ч. 1. Статика. М.: Вышш. шк., 1987. 320 с.
4. Шкутин Л.И. Численный анализ разветвленных форм изгиба стержней // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42, № 2. С. 141–147.
5. Нгуен Ван Хунг. Некоторые задачи устойчивости сжатых стержней и плоской формы изгиба полос: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1969. 21 с.
6. Ессеев А.Е. Оценка несущей способности стержневых металлических конструкций с учетом изгибо-крутильной формы потери устойчивости: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 1999. 22 с.
7. Белоусов В.П. Исследование устойчивости стержней при продольном и поперечном нагружении: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Джамбул, 1983. 20 с.
8. Шкутин Л.И. Численный анализ разветвленных форм изгиба арок // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42, № 4. С. 155–160.
9. Мануилов Г.А., Коцицын С.Б., Бегичев М.М. О критических и послекритических равновесиях в задачах устойчивости упругих систем // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2015. № 5. С. 47–54.
10. Галишикова В.В. Обобщенная геометрически нелинейная теория и численный анализ деформирования и устойчивости пространственных стержневых систем: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2011. 38 с.
11. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Физматгиз, 1968. 565 с.
12. Губина Т.Н., Андропова Е.В. Решение дифференциальных уравнений в системе компьютерной математики Maxima: Учеб. пособие. Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, 2009. 99 с.

Макеев Сергей Александрович, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: makeev608079@mail.ru

Сибирский автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), г. Омск

Краснощеков Юрий Васильевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: uv1942@mail.ru

Сибирский автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), г. Омск

Соколовский Зиновий Наумович, канд. техн. наук, доц.

Сибирский автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), г. Омск

Получено после доработки 20.10.17

Makeev Sergey Alexandrovich, DSc, Professor; E-mail: makeev608079@mail.ru
Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

Krasnoshchekov Yuriy Vasilyevich, DSc, Professor; E-mail: uv1942@mail.ru
Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

Sokolovskiy Zinoviy Naumovich, PhD, Ass. Professor
Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

ENGINEERING METHODS OF THE ANALYSIS OF THE SPATIAL DEFORMATION OF ELASTIC STRAIGHT RODS WITH ACCOUNT FOR THE GEOMETRIC NONLINEARITY

The results of implementation in the public tabular Pro-core processor MS Excel methods of integration of system of twelve differential equations of the stress-strain state describing the spatial behavior of an elastic beam in a geometrically nonlinear formulation using Euler's method (Runge–Kutta first order). The finite-difference form of representation of the resulting system of equations is allowed in the public tabular processor MS Excel to implement the algorithm of numerical integration of this system with automatic determination of initial parameters, gives the required boundary conditions at the other end of the rod using the built-in procedure "find a solution". This allows the designer without the involvement of specialized software to quickly analyze the behavior of the rods under load exceeding the critical Euler–Lagrange as in the total loss of longitudinal stability and loss of stability of the plane bending. The results of numerical and experimental tests of the two subproblems of spatial behavior of elastic rods with adjustment to loss of a flat form stability and analysis post critical deformation elements with the implementation of the beginning of one of the two symmetrical branches of the Trident bifurcation. For loads exceeding the Euler critical at 25 %, the calculated values of maximum deflections and angles of rotation of sections different from the experimental values by no more than 8 %.

K e y w o r d s: spatial deformation, total longitudinal stability of the rod, loss of stability of a flat from of deformation, critical load, postcritical behavior, geometric nonlinearity.

REFERENCES

1. V l a s o v V.Z. Tonkostennye uprugie sterzhni [Thin-walled elastic bars]. Moscow, 1959. 566 p. (in Russian)
2. T i m o s h e n k o S.P. Ustoychivost' uprugikh system [Stability of the elastic systems]. Moscow, 1955. 465 p. (in Russian)
3. S v e t l i t s k i y V.A. Mekhanika sterzhney [Mechanics of bars]. Moscow, 1987. 320 p. (in Russian)
4. S h k u t i n L.I. Chislennyj analiz razvetyvlennykh form izgiba sterzhney [Numerical analysis of ramified forms of the rods bend]. Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]. 2001. Vol. 42, No. 2. Pp. 141–147. (in Russian)
5. N g u e n V a n H u n g. Nekotorye zadachi ustoychivosti szhatykh sterzhney i ploskoy formy izgiba polos: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Some tasks of stability of compressed rods and flat form of the bands bend: author. dis. ... PhD]. Moscow, 1969. 21 p. (in Russian)
6. E v s e e v A.E. Otsenka nesushchey sposobnosti sterzhnevykh metallicheskikh konstruktsiy s uchetom izgibno-krutil'noy formy poteri ustoychivosti: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [The evaluation of bearing ability of rod metal designs in view of flexural-torsional form of loss of stability: author. dis. ... PhD]. Penza, 1999. 22 p. (in Russian)
7. B e l o u s o v V.P. Issledovanie ustoychivosti sterzhney pri prodl'nom i poperechnom nagruzhenii: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Research of stability of rods at longitudinal and cross-section load application: author. dis. ... PhD]. Dzhambul, 1983. 20 p. (in Russian)

8. Shkutin L.I. Chislenny analiz razvetvlenykh form izgiba arok [Numerical analysis of ramified forms of the arches bend]. Prikladnaya mehanika i tekhnicheskaya fizika [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]. 2001. Vol. 42, No. 4. Pp. 155–160. (in Russian)
 9. Manuylov G.A., Kositsyn S.B., Begichev M.M. O kriticheskikh i poslekriticheskikh ravnovesiyakh v zadachakh ustoychivosti uprugikh sistem [Of critical and the post critical balances in the tasks of stability of elastic systems]. Stroitel'naya mehanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy [Structural Mechanics and Analysis os Constructions]. 2015. No. 5. Pp. 47–54. (in Russian)
 10. Galishnikova V.V. Obobshchennaya geometricheski nelineynaya teoriya i chislenny analiz deformirovaniya i ustoychivosti prostranstvennykh sterzhnevykh sistem: avtoref. dis. ... doktora tekhn. nauk [The generalized geometrically nonlinear theory and the numerical analysis of deformation and stability of spatial systems: author. dis. ... DSc]. Moscow, 2011. 38 p. (in Russian)
 11. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Generalized geometrically nonlinear theory and numerical analysis of deformation and stability of spatial rod systems]. Moscow, 1968. 565 p. (in Russian)
 12. Gubina T.N., Andropova E.V. Reshenie differentsial'nykh uravneniy v sisteme komp'yuternoy matematiki Maxima [Solution of differential equations in the system of computer algebra Maxima]. Elets: EGU im. I.A. Bunina, 2009. 99 p. (in Russian)
-

ДОСТИЖЕНИЯ НАУКИ – ПРОИЗВОДСТВУ



УДК 624.042.7+621.311.2:699.841

А.Е. САРГСЯН, Е.Г. ГУКОВА

ОБОСНОВАНИЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЯ РЕЗЕРВНОЙ ДИЗЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Продемонстрирована концепция выполнения поверочных расчетов строительных конструкций и основания здания резервной дизельной электростанции (РДЭС) при нормальном режиме эксплуатации (НЭ) и максимально расчетном землетрясении (МРЗ). При этом рассматриваются: определение поэтажных обобщенных спектров отклика от МРЗ; проверка прочности строительных конструкций при НЭ + МРЗ; оценка несущей способности и устойчивости основания сооружения при НЭ + МРЗ. Разработаны статическая и динамическая конечно-элементные модели системы сооружение – основание РДЭС. Выполнены расчеты сооружения с применением ВК ANSYS. Определены обобщенные поэтажные спектры отклика при МРЗ. Установлено, что прочность несущих конструкций сооружения РДЭС при НЭ + МРЗ обеспечена. Проведена оценка несущей способности и устойчивости основания сооружения. Несущая способность и устойчивость основания при НЭ + МРЗ обеспечены.

Ключевые слова: концепция поверочных расчетов, расчет строительных конструкций, объемная расчетная модель, конечно-элементная модель, расчет РДЭС, прочность, оценка несущей способности, основание сооружения, обобщенные спектры отклика.

Введение. Сооружение резервной дизельной электростанции (РДЭС) относится к первой категории сейсмостойкости по НП-031-01; классу безопасности 2 согласно НП-001-97; I категории по ответственности по ПиН АЭ-5.6; в соответствии со статьей 4 п. 7 Федерального закона № 384-ФЗ – к повышенному уровню ответственности.

Расчетная модель системы сооружение – основание. Расчетная модель сформирована в соответствии с архитектурно-строительными решениями сооружения РДЭС. Для моделирования конструктивных элементов РДЭС, в состав которого входят фундаментная плита, стены, перекрытия, покрытие, стойки, балки, применяются стержневые, оболочечные и объемные элементы.

© Саргсян А.Е., Гукова Е.Г., 2017

Общее количество конечных элементов в модели – 121 785, узлов – 115 130.

Для всех железобетонных элементов используется упругий изотропный материал со следующими физико-механическими характеристиками по СП 63.13330.2012: модуль упругости $E_b = 2,4 \cdot 10^4$ МПа; коэффициент поперечной деформации $\nu = 0,2$; плотность $\rho = 2500$ кг/м³. Нагрузки и воздействия были приняты с учетом рекомендаций СП 20.13330.2011. Внешний вид конечно-элементной модели сооружения РДЭС представлен на рис. 1.

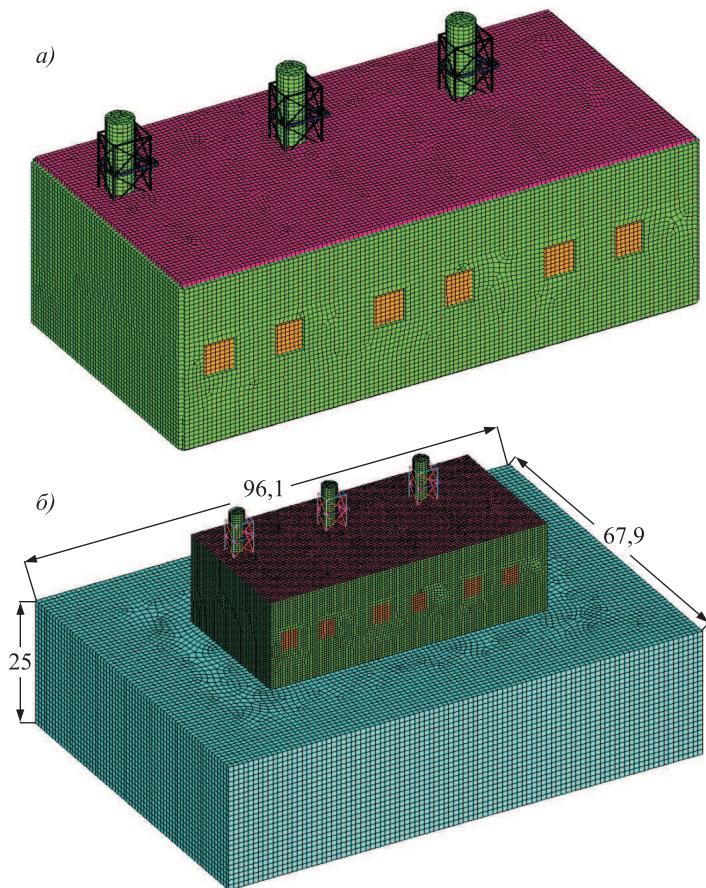


Рис. 1. Внешний вид конечно-элементной модели сооружения РДЭС (а) и конечно-элементной объемной модели основания (б)

Учету податливости грунтов, как известно, посвящено множество работ, в том числе [1–9]. Для учета податливости грунтов основания сооружения РДЭС при нормальном режиме эксплуатации (НЭ) применена объемная модель основания, рекомендованная МР 1.5.2.05.999.0025–2011, МР 1.5.2.05.999.0026–2011 и [7–9]. Объемная модель основания – грунтовый массив, моделируемый восьмиузловыми конечными элементами.

Среднее давление под подошвой фундамента не превышает расчетного сопротивления грунта основания $p_0 = 210$ кПа $< R = 1130$ кПа, в соответствии с п. 6.2.7 МР 1.5.2.05.999.0026–2011 следует применить расчетную схему в виде линейно деформируемого полупространства с условным ограничением

глубины сжимаемой толщи H_c . Нижняя граница сжимаемой толщи основания определена в соответствии с п. 6.2.24 $H_c = 25$ м. Приведенные деформационные статические характеристики грунтов основания по глубине сжимаемой толщи: модуль деформации $E = \sum E_i h_i / H_c = 34,1$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = \sum \nu_i h_i / H_c = 0,46$.

Назначены следующие граничные условия:

- боковые поверхности грунтового массива закреплены от поступательных перемещений из плоскости соответствующих поверхностей;
- нижняя поверхность грунтового массива закреплена от поступательных перемещений.

Механическая модель основания сооружения представляет собой совокупность пружинно-демпферных элементов, распределенных по контактной поверхности фундаментных конструкций с грунтовой средой, имитирующих жесткостные и демпфирующие свойства грунтовой среды при их взаимодействии. В узлах расчетной модели создаются три пружинно-демпферных элемента. Верхние концы всех трех элементов имеют общий узел и принадлежат расчетной модели, нижние концы – закреплены. Выражения для определения интегральных квазистатических и мгновенных жесткостей основания представлены в табл. 1.

Таблица 1. Выражения для определения интегральных квазистатических и мгновенных жесткостей основания

Вид перемещения	Интегральные квазистатические жесткости	Интегральные мгновенные жесткости
Горизонтальное по оси x	$k_x = \frac{31,1(1-\mu)G_d\sqrt{A}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu)}$	$c_x = \frac{18,24(1-\mu)G_d A}{\pi(7-8\mu)\nu_s}$
Горизонтальное по оси y	$k_y = \frac{31,1(1-\mu)G_d\sqrt{A}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu)}$	$c_y = \frac{18,24(1-\mu)G_d A}{\pi(7-8\mu)\nu_s}$
Вертикальное по оси z	$k_z = \frac{4G_d\sqrt{A}}{\sqrt{\pi}(1-\mu)}$	$c_z = \frac{3,4G_d A}{\pi(1-\mu)\nu_s}$

Примечание. $\mu = 0,46$ – осредненное значение коэффициента Пуассона по глубине сжимаемой толщи;

$A = L_x L_y = 57 \cdot 28,8 = 1641,6 \text{ м}^2$ – площадь подошвы фундамента;

$L_x, L_y (L_x \geq L_y)$ – длина и ширина фундамента на плане соответственно по координатным осям x и y ;

$G_d = 443$ МПа – осредненное значение динамического модуля сдвига по глубине сжимаемой толщи;

$\nu_s = 459 \text{ м/с}$ – скорость поперечных волн грунта по глубине сжимаемой толщи.

Значения интегральных квазистатических и мгновенных жесткостей основания приведены в табл. 2.

Результаты расчетов. При НЭ расчеты модели выполняются отдельно на каждую нагрузку с соответствующими коэффициентами надежности по нагрузке согласно СП 20.13330.2011. Используя данные результатов расчетов, составляют основные комбинации загружений. Среди всех этих основ-

Таблица 2. Значения интегральных жесткостей основания

Квазистатические жесткости, кН/м		Мгновенные жесткости, кН · с/м	
k_x	$5,13 \cdot 10^7$	c_x	$1,5 \cdot 10^6$
k_y	$5,13 \cdot 10^7$	c_y	$1,5 \cdot 10^6$
k_z	$7,51 \cdot 10^7$	c_z	$3,18 \cdot 10^6$

ных комбинаций находят минимальные и максимальные значения перемещений, напряжений и внутренних усилий в каждом элементе. Таким образом, мы получаем наиболее неблагоприятные условия работы для каждого расчетного элемента при НЭ.

Для оценки сейсмостойкости сооружений в настоящее время разработаны различные методы [1, 10–12]: квазистатический, спектральный, прямой динамический и т. д.

При НЭ + МРЗ расчет выполняется следующим образом. Производится расчет на максимально расчетное землетрясение (МРЗ) прямым динамическим методом. Трехкомпонентная акселерограмма от воздействия МРЗ представлена на рис. 2.

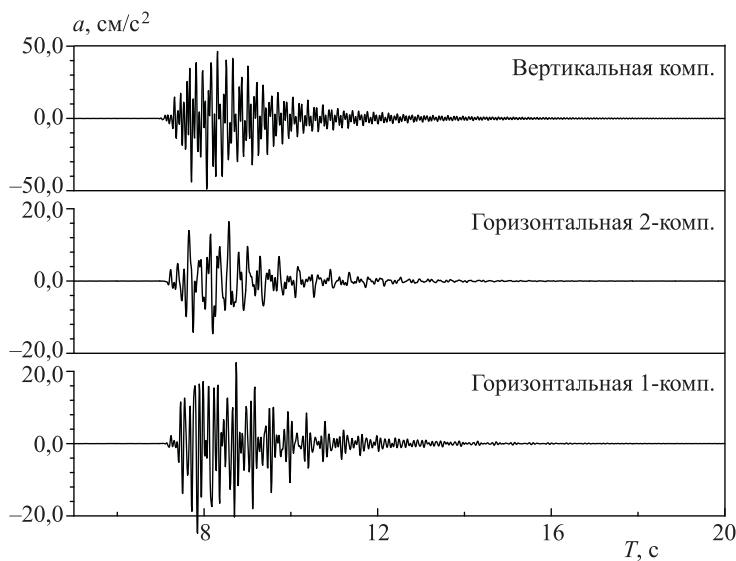


Рис. 2. Трехкомпонентная акселерограмма, соответствующая обобщенным спектрам отклика при МРЗ с вероятностью непревышения 84 %

В результате расчетов определяются значения перемещений, ускорений, напряжений и внутренних усилий во всех элементах в каждый момент времени. Среди всех этих результатов находят минимальные и максимальные значения перемещений, напряжений и внутренних усилий. Выполняется расчет при НЭ с соответствующими коэффициентами сочетаний согласно МР 1.5.2.05.999.0025–2011. В результате расчетов определяются перемещения, напряжения и внутренние усилия, которые предшествуют дополнительным напряжениям от МРЗ. Для составления особых сочетаний складываются

результаты расчета при НЭ с минимальными результатами расчетов при МРЗ, аналогично суммируются и максимальные значения. Таким образом, получаем особые расчетные сочетания для сооружения РДЭС. При определении инерционных характеристик для динамического расчета приняты коэффициенты сочетания согласно МР 1.5.2.05.999.0025–2011.

При расчете системы сооружение – основание на воздействие от МРЗ параметры затухания Рэлея определялись по формулам [9]:

$$\bar{\alpha} = \frac{4\pi\xi f_1 f_2}{f_1 + f_2}; \quad \bar{\beta} = \frac{\xi}{\pi(f_1 + f_2)},$$

где ξ – коэффициент затухания;

f_1 – минимальная частота среза;

f_2 – максимальная частота среза.

Параметры затухания Рэлея при МРЗ следующие: $\xi = 0,07$; $f_1 = 3,72$ Гц; $f_2 = 35,0$ Гц; $\bar{\alpha} = 2,9564$; $\bar{\beta} = 0,000576$.

Поэтажные обобщенные спектры отклика на фундаментной плите сооружения РДЭС от воздействия уровня МРЗ представлены на рис. 3.

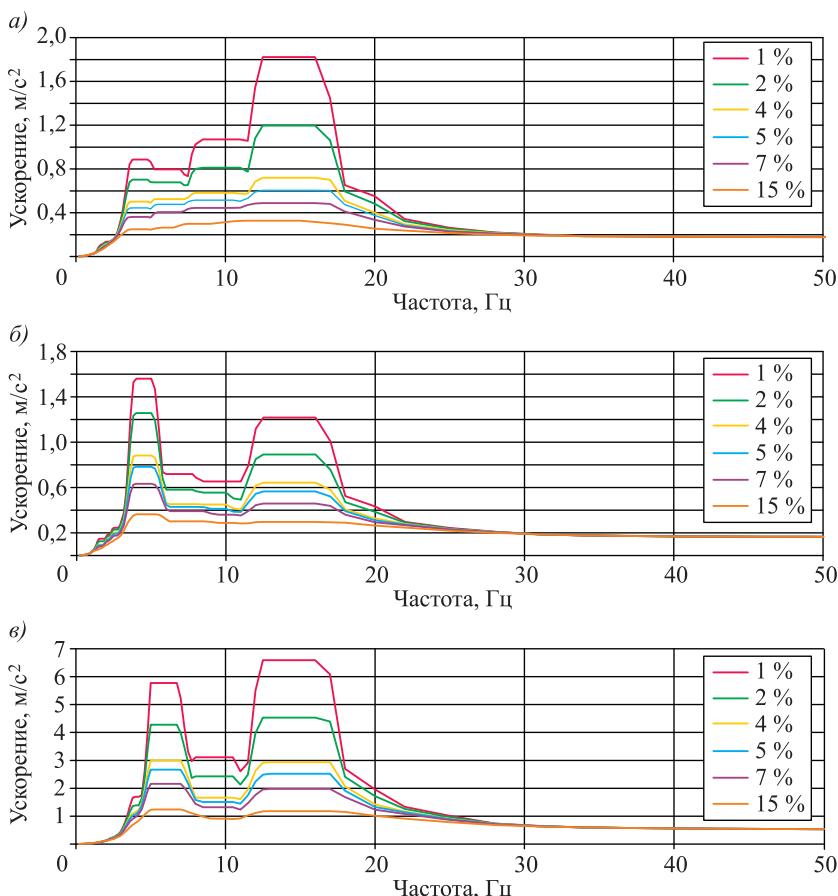


Рис. 3. Обобщенные спектры ускорений на отметке –7,200 сооружения РДЭС (3 ячейки) от МРЗ

а – по горизонтальной оси x $ZPA = 0,17$ м/с 2 ; б – по горизонтальной оси y $ZPA = 0,16$ м/с 2 ; в – по вертикальной оси z $ZPA = 0,50$ м/с 2

Оценка прочности фундаментной плиты.

Геометрические характеристики:

$h = 0,70$ м – толщина фундаментной плиты;

$a = 0,05$ м – высота защитного слоя.

Характеристика бетона класса В15:

$R_b = 8,5$ МПа – расчетное сопротивление бетона осевому сжатию;

$R_{bt} = 0,75$ МПа – расчетное сопротивление бетона осевому растяжению.

Характеристика рабочей арматуры класса А400:

$R_s = 350$ МПа – расчетное сопротивление арматуры осевому растяжению;

$R_{sc} = 350$ МПа – расчетное сопротивление арматуры осевому сжатию.

Сопоставление фактического и расчетного армирования фундаментной плиты:

Фактическое армирование, мм²/м

Площадь нижнего армирования по оси x на опоре (оси 1–9)	3079
Площадь нижнего армирования по оси y на опоре (оси А, В)	3079
Площадь верхнего армирования по оси x в пролете (между осями 1–2, 2–3, 4–5, 5–6, 7–8, 8–9)	3079
Площадь верхнего армирования по оси y в пролете (между осями А–В)	1571

Расчетное армирование, мм²/м

Площадь нижнего армирования по оси x на опоре при НЭ, НЭ + МРЗ	2784
Площадь нижнего армирования по оси y на опоре при НЭ, НЭ + МРЗ	2553
Площадь верхнего армирования по оси x в пролете при НЭ, НЭ + МРЗ	2599
Площадь верхнего армирования по оси y в пролете при НЭ, НЭ + МРЗ	1362

Коэффициенты запаса прочности

Отношение фактической к расчетной площади армирования по оси x на опоре	1,11
Отношение фактической к расчетной площади армирования по оси y на опоре	1,21
Отношение фактической к расчетной площади армирования по оси x в пролете	1,18
Отношение фактической к расчетной площади армирования по оси y в пролете	1,15

Следовательно, прочность фундаментной плиты в режиме НЭ + МРЗ будет обеспечена.

Оценка несущей способности и устойчивости основания. Оценку несущей способности основания выполняем на действие вертикальной составляющей внецентренной нагрузки, передаваемой фундаментом на грунт, исходя из условия, представленного в МР 1.5.2.05.999.0026–2011

$$N_a \leq \frac{\gamma_{c,eq}}{\gamma_n} N_{u,eq},$$

где N_a – расчетная величина внешней силы на основании при особом сочетании нагрузок;

$N_{u,eq}$ – сила предельного сопротивления основания при особом сочетании нагрузок;

$\gamma_{c,eq}$ – коэффициент условий работы, принимаемый равным 0,8;
 γ_n – коэффициент надежности по назначению сооружения, принимаемый равным 1,2 для сооружений первой категории ответственности.

При расчете несущей способности оснований с учетом нагрузок от особых воздействий, ординаты эпюры предельного давления, приложенного по краям подошвы фундамента P_0 и P_b , устанавливаются по формулам:

$$P_0 = \xi_q F_1 \gamma'_I d + \xi_c (F_1 - 1) c_I \operatorname{tg} \varphi_I;$$

$$P_b = P_0 + \xi_\gamma \gamma_I b (F_2 - k_{eq} F_3),$$

где ξ_q , ξ_c , ξ_γ – коэффициенты формы, определяемые по формулам:

$$\xi_\gamma = 1 - \frac{0,25}{\eta}; \quad \xi_q = 1 + \frac{1,5}{\eta}; \quad \xi_c = 1 + \frac{0,3}{\eta}; \quad \eta = \frac{l}{b};$$

l и b – соответственно длина и ширина подошвы фундамента;

$F_1 = 5$, $F_2 = 3$, $F_3 = 10$ – коэффициенты, определяемые в зависимости от расчетного средневзвешенного значения угла внутреннего трения грунтов основания в пределах призмы выпора $\varphi_I = 20,0^\circ$;

$\gamma'_I = 21,3 \text{ кН/м}^3$ и $\gamma_I = 19,7 \text{ кН/м}^3$ – расчетные значения удельного веса грунтов, находящихся выше и ниже подошвы фундамента соответственно;
 $d = 7,75 \text{ м}$ – глубина заложения фундамента;

$k_{eq} = 0,1$ – коэффициент сейсмичности для площадки АЭС.

Эксцентрикитеты внешней результирующей силы e_a и эпюры предельного давления e_u определяются по формулам:

$$e_a = \frac{M_{a,eq}}{N_{a,eq}}; \quad e_u = \frac{b(P_b - P_0)}{6(P_b + P_0)},$$

где $N_{a,eq}$, $M_{a,eq}$ – расчетные величины вертикальной составляющей результирующей силы и момента относительно главной центральной оси инерции подошвы фундамента, направленной вдоль ее длины, при особом сочетании нагрузок.

В зависимости от соотношения между значениями e_a и e_u вертикальная составляющая силы предельного сопротивления основания $N_{u,eq}$:

при $e_a \leq e_u$

$$N_{u,eq} = 0,5bl(P_b + P_0);$$

при $e_a > e_u$

$$N_{u,eq} = \frac{blP_b}{\left(1 + \frac{6e_a}{b}\right)}.$$

Проверка несущей способности контактной поверхности сооружения с основанием на сдвиг фундамента по подошве выполняется, исходя из условия

$$T_{a,eq} \leq T_{u,eq} = \frac{\gamma_{c,eq}}{\gamma_n} [N_a \operatorname{tg}(\varphi'_I - \Delta\varphi) + c'_I A] = \frac{\gamma_{c,eq}}{\gamma_n} T_u,$$

где $T_{a,eq}$ – горизонтальная составляющая внешней результирующей силы с учетом особых воздействий;

$T_{u,eq}$ – предельная величина несущей способности грунтов основания сооружения на сдвиг фундамента по подошве;

$\phi'_I = 20,0^\circ$; $c'_I = 20,0$ кПа – расчетные значения угла внутреннего трения и удельного сцепления грунтов на уровне подошвы фундамента сооружения.

При сейсмических воздействиях $\Delta\varphi$ принимается в зависимости от расчетной сейсмичности площадки по шкале MSK-64 – 7 баллов $\Delta\varphi = 2^\circ$.

Дополнительные необходимые исходные данные для выполнения расчетов:

$Q = 3,43 \cdot 10^5$ кН – собственный вес сооружения;

$x_c = -1,493$ м; $y_c = 0,035$ м; $z_c = 7,1403$ м – координаты центра тяжести сооружения в декартовой системе координат XYZ , начало которой помещено в геометрическом центре фундаментной плиты сооружения, при этом ось z направлена вверх, а оси x и y – по главным осям инерции фундаментной плиты; $L_x = l = 57,0$ м; $L_y = b = 28,8$ м – размеры фундаментной плиты в форме прямоугольника в плане;

$A = 1641,6$ м² – площадь подошвы сооружения;

$T_{\max}(t) = \left| \sqrt{T_x^2(t) + T_y^2(t)} \right|_{\max}$ – максимальное значение модуля вектора результирующей горизонтальной силы на подошве сооружения, возникающей от воздействий МРЗ;

$N_{z \max}(t)$ – максимальное значение результирующей вертикальной силы, возникающей на подошве сооружения от воздействий МРЗ;

$M_{x \max}(t)$ – максимальное значение результирующего момента на подошве сооружения относительно оси x при МРЗ;

$N_{sa, \max} = Q + N_{z \max}(t)$ – расчетная величина вертикальной результирующей силы, действующей на подошве сооружения при НЭ + МРЗ;

$M_{x \max} = Qy_c + M_{x \max}(t)$ – расчетная величина вертикального результирующего момента относительно оси x , действующего на подошве сооружения при НЭ + МРЗ;

$k_{NM} = \frac{N_{u,eq}}{N_{a,eq}}$ – коэффициент запаса несущей способности основания при действии внекентренной вертикальной силы;

$k_T = \frac{T_{u,eq}}{T_{a,eq}}$ – коэффициент запаса несущей способности основания на сдвиг по подошве сооружения;

$e_a = \frac{M_{sa, \max}}{N_{sa, \max}}$ – эксцентриситет внешней вертикальной силы с учетом особых сочетаний нагрузок при НЭ + МРЗ;

e_u – эксцентриситет предельного давления на поверхности подошвы сооружения.

Результаты оценки несущей способности основания при НЭ + МРЗ: $N_a = 3,60E + 08$ Н; $T_a = 1,04E + 07$ Н; $\gamma_{c,eq}N_{u,eq}/\gamma_n = 2,44E+09$ Н; $\gamma_{c,eq}T_{u,eq}/\gamma_n = 9,62E + 07$ Н; $k_N = 6,8$; $k_T = 9,2$.

Из представленных результатов расчетов следует, что несущая способность основания сооружения РДЭС с большим запасом обеспечена как на действие вертикальной составляющей внецентренной нагрузки, передаваемой фундаментом на грунт, так и на действие горизонтальной составляющей нагрузки на сдвиг по подошве фундамента. Следует отметить, что расчеты сооружения на возможность сдвига по подошве фундамента вы-

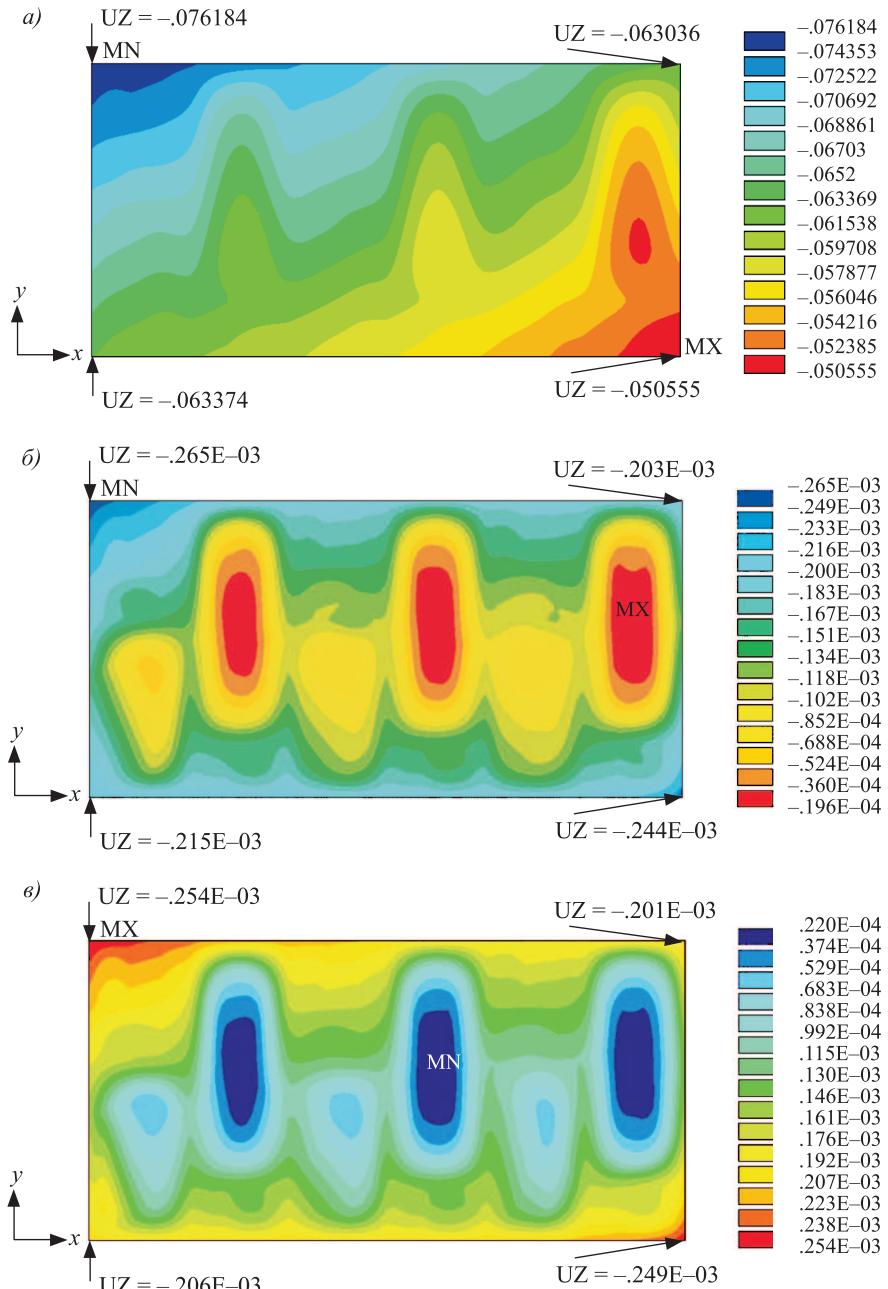


Рис. 4. Изополя вертикальных перемещений (м) фундаментной плиты при НЭ (а) и изополя минимальных (б) и максимальных (в) вертикальных перемещений (м) фундаментной плиты от воздействия МРЗ

полнены консервативно, так как не учитывалось заглубление сооружения в грунт.

Изополя вертикальных перемещений фундаментных конструкций при НЭ, а также изополя минимальных и максимальных вертикальных перемещений фундаментных конструкций от воздействия МРЗ представлены на рис. 4.

Для того чтобы осадка и крен не превышали предельных значений при НЭ, НЭ + МРЗ, должны выполняться следующие условия:

$$S_{\max} < S_u; \quad i_{\max} < i_u,$$

где $S_{\max} = 0,0764$ м – максимальная осадка при НЭ + МРЗ;

$S_u = 0,30$ м – допускаемая осадка при НЭ + МРЗ;

$i_{\max} = 9,08 \cdot 10^{-4}$ – максимальный крен при НЭ + МРЗ;

$i_u = 0,003$ – предельная допустимая величина крена при НЭ + МРЗ в соответствии с требованиями МР 1.5.2.05.999.0026–2011.

При НЭ + МРЗ осадка и крен здания не превышают предельных значений:

$$S_{\max} = 0,0762 < S_u = 0,30 \text{ м}; \quad i_{\max} = 0,000908 < i_u = 0,003.$$

Следовательно, устойчивость основания как при нормальном режиме, так и при максимальном расчетном землетрясении обеспечена.

Заключение. Разработаны статическая и динамическая конечно-элементные модели системы сооружение – основание РДЭС. Выполнены расчеты сооружения РДЭС с применением ВК ANSYS. Определены обобщенные поэтажные спектры отклика при МРЗ.

Проверка прочности показала, что прочность несущих конструкций сооружения РДЭС при НЭ + МРЗ обеспечена. Проведена оценка несущей способности и устойчивости основания сооружения РДЭС. Установлено, что несущая способность и устойчивость основания при НЭ + МРЗ обеспечены.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цытович Н.А., Березанцев В.Г., Далматов Б.И., Абелев М.Ю. Основания и фундаменты. М.: Высш. шк., 1970.
2. Жемочкин Б.Н., Синицын А.П. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании (без гипотезы Винклера). М.: Госстройиздат, 1947.
3. Жемочкин Б.Н. Расчет круглых плит на упругом основании на симметричную нагрузку. М.: Изд. ВИА, 1938.
4. Сеймов В.М., Островерх Б.Н., Ермоленко А.И. Динамика и сейсмостойкость гидротехнических сооружений. Киев: Наук. думка, 1983.
5. Сеймов В.М. Динамические контактные задачи. Киев: Наук. думка, 1976.
6. Ухов С.Б., Семенов В.В., Знаменский В.В. и др. Механика грунтов, основания и фундаментов. М.: Изд-во АСВ, 1994.
7. Саргсян А.Е., Гукова Е.Г., Гришин А.С. Разработка и обоснование механической и математической модели основания сооружений атомных станций в виде однородного инерционного полупространства // Вестн. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Исследования по теории сооружений. 2009. № 1.

8. Саргсян А.Е., Гукова Е.Г., Гришин А.С. Разработка и обоснование применимости динамической механической модели основания сооружений в виде однородного инерционного полупространства // Вестн. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Исследования по теории сооружений. 2011. № 3–4.
9. Саргсян А.Е. Динамика и сейсмостойкость сооружений атомных станций. М.: Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013.
10. Николаенко Н.А. Динамика и сейсмостойкость конструкций, несущих резервуары. М.: Госстройиздат, 1963.
11. Бирбараев А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб.: Наука, 1998.
12. Медведев С.В., Карапетян Б.К., Быховский В.А. Сейсмические воздействия на здания и сооружения. М.: Стройиздат, 1968.

Саргсян Акоп Егишович, д-р техн. наук, проф., начальник НИОДиС АО «Атомэнергопроект», г. Москва

Гукова Елена Геннадьевна, главный специалист НИОДиС АО «Атомэнергопроект», г. Москва

Получено после доработки 19.10.17

Sargsyan Akop Egishovich, DSc, Professor, Head of department, JSC «Atomenergoproekt», Moscow, Russia

Gukova Elena Gennadievna, Chief specialist, JSC «Atomenergoproekt», Moscow, Russia

SUBSTANTIATION OF SEISMIC SAFETY OF THE STANDBY DIESEL POWER PLANT

The concept of the verification analysis of Standby Diesel Power Plant (SDPP) foundation and structures at NO (Normal Operation mode) + SSE (Safe Shutdown Earthquake) is demonstrated. Let us consider: enveloped floor response spectra calculation at the SSE level; checking the strength of building structures at NO + SSE; Assessment of load-bearing capacity and stability of the foundation of the structure at NO + SSE. The static and dynamic finite-element models of the soil – structure system for the SDPP have been developed. The analysis of the structure were represented using ANSYS software. The enveloped floor response spectra were calculated at the SSE. The strength calculations were performed and it was established that the strength of the bearing structures of the RDES at NO + SSE is ensured. The load-bearing capacity and stability of the foundation of the structure were estimated. It is established that the load-bearing capacity and stability of the base in the case of NO + SSE is ensured.

К e y w o r d s: verification analysis, calculation of the structures, spatial calculation model, finite element model, analysis of Standby Diesel Power Plant, strength, estimation of bearing capacity, foundation of the structure, enveloped response spectra.

REFERENCES

1. Tsytovich N.A., Berezantsev V.G., Dalmatov B.I., Abelev M.Yu. Osnovaniya i fundamenti [Bases and foundations]. Moscow, 1970. (in Russian)
2. Zhemochkin B.N., Sinitsyn A.P. Prakticheskie metody rascheta fundamentnykh balok i plit na uprugom osnovanii (bez gipotezy Vinklera) [Practical methods for calculating foundation beams and plates on an elastic foundation (without Winkler's hypothesis)]. Moscow, 1947. (in Russian)

3. Zhemochkin B.N. Raschet kruglykh plit na uprugom osnovanii na simmetrichnyu nagruzku [Calculation of circular plates on an elastic foundation on a symmetrical load]. Moscow, 1938. (in Russian)
 4. Seymov V.M., Ostroverkh B.N., Ermolenko A.I. Dinamika i seysmostoykost' gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Dynamics and seismic resistance of hydrotechnic structures]. Kiev, Naukova Dumka, 1983. (in Russian)
 5. Seymov V.M. Dinamicheskie kontaktnye zadachi [Dynamic contact problems]. Kiev, Naukova Dumka, 1976. (in Russian)
 6. Ukhov S.B., Semenov V.V., Znamenskiy V.V. et al. Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamentov [Mechanics of soils, bases and foundations]. Moscow, 1994. (in Russian)
 7. Sargsyan A.E., Gukova E.G., Grishin A.S. Razrabotka i obosnovanie mekhanicheskoy i matematicheskoy modeli osnovaniya sooruzheniy atomnykh stantsiy v vide odnorodnogo inertsionnogo poluprostranstva [Generation and proof for dynamic mechanical model of NPP structures foundation in the form of uniform inertial soil half-space]. Vestnik TSNIISK im. V.A. Kucherenko [The Investigations for Structural Analysis, V.A. Kucherenko Institute Herald]. 2009. No. 1. (in Russian)
 8. Sargsyan A.E., Gukova E.G., Grishin A.S. Razrabotka i obosnovanie primenimosti dinamicheskoy mekhanicheskoy modeli osnovaniya sooruzheniy v vide odnorodnogo inertsionnogo poluprostranstva [Development and validation of the applicability of the dynamic mechanical model of the foundation of structures in the form of a homogeneous inertial half-space]. Vestnik TSNIISK im. V.A. Kucherenko [The Investigations for Structural Analysis, V.A. Kucherenko Institute Herald]. 2011. No. 3–4. (in Russian)
 9. Sargsyan A.E. Dinamika i seysmostoykost' sooruzheniy atomnykh stantsiy [Dynamic and Seismic Stability of the NPP Structures]. Moscow, Sarov, RFNC–VNIIEF, 2013. (in Russian)
 10. Nikolaenko N.A. Dinamika i seysmostoykost' konstruktsiy, nesushchikh rezervuary [Dynamics and seismic stability of structures carrying reservoirs]. Moscow, 1963. (in Russian)
 11. Birbraer A.N. Raschet konstruktsiy na seysmostoykost' [Calculation of structures for seismic resistance]. Saint Petersburg, 1998. (in Russian)
 12. Medvedev S.V., Karapetyan B.K., Bykovskiy V.A. Seismicheskie vozdeystviya na zdaniya i sooruzheniya [Seismic effects on buildings and structures]. Moscow, 1968. (in Russian)
-

УКАЗАТЕЛЬ

статей, опубликованных в 2017 г. (№ 1–12)

ТЕОРИЯ СООРУЖЕНИЙ

- Герасимов С.И., Сыч Т.В., Попов А.М.** Численное моделирование волновых процессов при ударном погружении металлических стержней в грунт № 7
- Гербер Ю.А., Себешев В.Г.** Особенности расчета надежности динамически нагруженных систем с учетом эффекта нелинейности амплитудно-частотных характеристик в резонансных зонах № 5
- Горынин Г.Л., Снигирева В.А.** Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния трубобетонных конструкций с учетом нелинейного поведения бетона № 4
- Игнатьев А.В., Игнатьев В.А., Гамзатова Е.А.** Анализ изгибаемых пластинок, имеющих жесткие включения или отверстия, по МКЭ в форме классического смешанного метода № 9
- Немировский Ю.В.** Предельное состояние балок на упругом основании № 2
- Самошкин А.С., Тихомиров В.М.** Исследование нелинейного деформирования железобетона экспериментально-расчетными методами № 5

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ

- Адищев В.В., Мальцев В.В.** Применение нелинейных диаграмм деформирования бетона для расчета напряженно-деформированного состояния в железобетонной балке численно-аналитическим методом № 1
- Адищев В.В., Мальцев В.В.** Определение напряженно-деформированного состояния в армированных балках из однородного ячеистого материала численно-аналитическим методом № 4
- Адищев В.С., Мальцев В.В., Данилов М.Н.** Верификация численно-аналитического метода определения прогибов с помощью численного моделирования № 9
- Бокарев С.А., Проценко Д.В.** Экспериментально-теоретические исследования пролетного строения сборно-разборного моста ТАЙПАН № 8
- Журавлев А.А., Журавлев Д.А.** Расчет устойчивости стержневой конструкции многогранной конфигурации № 10
- Жывалевская И.В., Кремнев А.П.** Определение несущей способности винтовых свай, выполняемых в защитной среде цементного раствора № 10
- Исаков А.Л., Смолин Ю.П.** Применение виброзащитных конструкций подрельсовых оснований на линиях метрополитена для уменьшения влияния вибрации в зданиях № 8
- Кользеев А.А.** Влияние формы сечения на устойчивость сжатых сварных труб из двух уголков в составе трехпоясных ферм № 1
- Коробова О.А., Максименко Л.А., Шестернева А.А.** К вопросу прогнозирования предельного напряженного состояния анизотропных грунтовых оснований № 7

- Краснощеков Ю.В.** Несущая способность по наклонным сечениям железобетонных элементов при совместном действии поперечных сил и моментов № 11–12
- Ланис А.Л., Воробьев В.С., Разуваев Д.А., Ломов П.О.** Определение несущей способности набивной сваи по грунту, выполненной в раскатанной скважине № 9
- Ланис А.Л., Попов А.М., Ломов П.О.** Устройство оснований методом раскатки скважин с инъектированием твердеющего раствора № 7
- Матвеев С.А., Мартынов Е.А., Литвинов Н.Н.** Моделирование и расчет армированного основания из зернистых материалов № 10
- Митасов В.М., Адищев В.В., Стаценко Н.В.** Концепция предельных состояний конструкций и их проверка по российским нормам и Еврокодам № 8
- Смирнов А.В., Баженова А.Ю., Демин А.С.** О критериях динамической прочности проезжей части автомобильных дорог № 9
- Ставницер Л.Р., Буслов А.С., Бахолдин Б.В., Айзенберг Я.М.** Устойчивость траншей при устройстве «стены в грунте» с учетом вибрации № 2
- Талантова К.В.** Несъемная опалубка из сталифибробетонных гнутых профилей № 7
- Цветков Н.А., Хугорной А.Н., Толстых А.В., Колесникова А.В.** Физико-математическая модель тепловлагопереноса в ограждающих конструкциях из профилированного теплового бруса № 2

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

- Абдрахимов В.З., Лобачев Д.А., Кайракбаев А.К., Абдрахимова Е.С.** Жаростойкий композит на основе фосфатных связующих, нанотехнологенных высокоглиноземистых и щелочно-земельных отходов № 3
- Бартеньева Е.А., Машкин Н.А.** Влияние вида пенообразователей и технологических факторов на свойства пенобетона № 8
- 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 дизелькометрии № 5
- Бердов Г.И., Плетнев П.М., Бернацкий А.Ф., Хританков В.Ф., Виноградов С.А.** Исследование влияния дисперсных минеральных добавок на свойства строительных материалов на цементных вяжущих дизелькометрическим методом № 6
- Береговой В.А., Снадин Е.В.** Использование технологических масс на основе химически активированного природного сырья в производстве ячеистого стекла № 3
- Власов В.А., Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д., Вакс И.В.** Радиоизотопный метод контроля содержания минеральных примесей в пастах и шламах при производстве органоминеральных смесей в дорожном строительстве № 8
- Гныря А.И., Абзаев Ю.А., Коробков С.В., Бояринцев А.П., Мокшин Д.И., Гаусс К.С.** Исследование механических свойств твердеющего цементного камня при различных изотермических условиях № 6
- Гныря А.И., Абзаев Ю.А., Коробков С.В., Бояринцев А.П., Мокшин Д.И., Гаусс К.С.** Влияние времени и повышенной температуры на структурообразование цементного камня № 8

- Гныря А.И., Абзаев Ю.А., Коробков С.В., Мокшин Д.И., Гаусс К.С., Бояринцев А.П.** Влияние длительности низкотемпературного твердения на структуру цементного камня № 5
- Гусев К.П., Коротаева З.А., Полубояров В.А.** Определение физико-механических характеристик огнеупорных строительных изделий на основе силикатного вяжущего материала и отходов керамики металлургического производства № 1
- Ерофеев В.Т., Федорцов А.П., Богатов А.Д., Федорцов В.А.** Оценка и прогнозирование физико-химического сопротивления стеклощелочных композитов и методы его повышения № 6
- Игнатова О.А., Макарова Н.В.** Влияние ультрадисперсной добавки сажевого пигмента на свойства гипсоцементно-пушцоланового вяжущего № 11–12
- Ильина Л.В., Бердов Г.И., Гичко Н.О.** Влияние комплексных дисперсных минеральных добавок на прочность цементного камня № 1
- Ильина Л.В., Гичко Н.О., Теплов А.Н., Туляганов А.К.** Изменение структуры и пористости цементного камня при введении дисперсного известняка № 9
- Исламов А.М., Фахрутдинова В.Х., Абдрахманова Л.А.** Исследование структуры ПВХ материалов, поверхностно усиленных полиизоцианатом № 3
- Коновалова Н.А., Дабижя О.Н., Панков П.П.** Структурообразование цементогрунтов в присутствии стабилизирующей добавки криогелит № 8
- Логанина В.И., Кислицына С.Н., Мажитов Е.Б.** Свойства жидкого стекла с добавкой золя кремниевой кислоты № 8
- Логанина В.И., Кислицына С.Н., Фролов М.В.** Активность высокопористых наполнителей для теплоизоляционных сухих строительных смесей № 5
- Межидов В.Х., Абдуллаев А.М.** Особенности формирования зерен портландцемента при совместном помоле клинкера и гипсового камня № 3
- Мирюк О.А.** О формировании высокопористой структуры магнезиальных композиционных материалов № 11–12
- Низина Т.А., Артамонов Д.А., Низин Д.Р., Чернов А.Н., Андронычев Д.О.** Анализ влияния отвердителя на климатическую стойкость эпоксидных композиционных материалов № 1
- Новиков Н.С., Жжоных А.М.** Влияние теплофизических свойств пустот на теплопроводность мелкоштучных изделий № 3
- Овчаренко Г.И.** Высокоморозостойкий шлакосодержащий цементный бетон № 11–12
- Пичугин А.П., Батин М.О., Кудряшов А.Ю., Никитенко К.А.** Эксплуатационные свойства древесины, модифицированной полимерными композициями с нанодобавками № 11–12
- Сарантуюя Ж., Дашибамц Д., Себелев И.М.** Изменение прочности на сжатие элементов деревянных конструкций, эксплуатируемых в условиях Монголии № 11–12
- Селяев В.П., Куприяшкина Л.И., Киселев Н.Н., Селяев П.В.** Оптимизация состава наполнителя вакуумной теплоизоляционной панели на основе пирогенного микрокремнезема № 5
- Селяев В.П., Седова А.А., Куприяшкина Л.И., Осипов А.К., Куприяшкина Е.И., Гарынкина Е.Н.** Сравнительная характеристика влияния минераль-

- ных кислот на прочность цементного камня, наполненного цеолитсодержащей породой № 1
Столбоушкин А.Ю., Фомина О.А., Акст Д.В. Практическое использование метода компрессионных кривых для определения параметров прессования керамических изделий № 6
Траутвайн А.И., Яковлев Е.А., Силко А.А. Взаимосвязь деформативной устойчивости асфальтобетонных покрытий и основных свойств органических вяжущих материалов № 9
Хадбаатар А., Машкин Н.А., Стенина Н.Г., Молчанов В.С., Петров И.И., Зибницацкая Н.Е. Использование золошлаковых отходов ТЭЦ Монголии в автодорожном строительстве № 10
Черкасов В.Д., Бузулуков В.И., Емельянов А.И., Киселев Е.В. Повышение пластической прочности пенобетона, получаемого из сухих смесей № 10

**ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ
НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА**

- Гальперин Е.М.** Условия функционирования и надежность кольцевой водопроводной сети: заблуждения и реальность № 2
Гириков О.Г. К оптимизации системы усреднитель–реактор в схемах очистки производственных сточных вод № 9
Зиганшин А.М., Бадыкова Л.Н. Численное моделирование течения в профилированном вентиляционном тройнике на слияние № 6
Ким А.Н., Давыдова Е.В. Модернизация фильтрующего модуля ФМС на дождевой канализационной сети № 7
Китаев Д.Н., Хузин В.Ю., Щербаков В.И., Щукина Т.В. Температурный режим в магистральных стальных трубопроводах горячего водоснабжения при нарушениях циркуляции № 3
Костин В.И. Совершенствование нормативной базы по проектированию систем климатизации промышленных зданий № 7
Кочев А.Г., Соколов М.М., Кочева Е.А., Жарнаков А.С. Анализ применения энергосберегающих технологий в православных храмах № 9
Кочева М.А., Суворов Д.В. Влияние электрического поля на факел пламени в топке теплогенератора № 10
Маклаков Д.В., Посохин В.Н., Сафиуллин Р.Г. О снижении потерь давления в возмущающих элементах воздуховодных систем № 8
Рохлецова Т.Л., Кривова Н.С., Кияница Л.А. Влияние реконструкции оконных проемов на величину удельной отопительной характеристики типовых панельных зданий № 3
Самарин О.Д. О целесообразности применения свободного охлаждения в системах кондиционирования воздуха в холодный период года № 5
Самарин О.Д. Особенности утилизации теплоты вытяжного воздуха при механической вентиляции и большом числе вытяжных систем № 4
Солопанов Е.Ю., Кульков В.Н., Кудрявцева Е.В., Широков А.Е. Математическая модель и статистическая обработка данных воздушной регенерации иммобилизованного ила в аэротенке № 2
Шиляев М.И., Хромова Е.М., Дорошкина А.А. Расчет многоступенчатой инерционно-конденсационно-абсорбционной пыле- и газоочистки промыш-

ленных выбросов в атмосферу. Часть 1. Универсальный метод расчета инерционных пылеуловителей и каскадов из них № 1

Шиляев М.И., Хромова Е.М., Дорошкина А.А. Расчет многоступенчатой инерционно-конденсационно-абсорбционной пыле- и газоочистки промышленных выбросов в атмосферу. Часть 2. Конденсационно-абсорбционная модель процесса тепломассообмена и комплексной пылегазоочистки в форсуночных аппаратах № 2

Шиляев М.И., Хромова Е.М., Дорошкина А.А. Расчет многоступенчатой инерционно-конденсационно-абсорбционной пыле- и газоочистки промышленных выбросов в атмосферу. Часть 3. Система сквозного расчета многоступенчатой пыле- и газоочистки дымовых газов котельных и ТЭС № 3

Шиляев М.И., Хромова Е.М., Ананьин К.В., Карасев Д.В. Моделирование процесса тепломассообмена в трубчатом абсорбере № 10

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Гахова Л.Н., Кузнецова Ю.А. Расчет напряженного состояния сталежелезобетонных турбинных водоводов в трехмерной постановке с учетом гидравлического удара № 7

Дегтярев В.В., Орлова Е.О., Яненко А.П. О некоторых аспектах обеспечения безопасности при пропуске судов через судопропускные сооружения № 5

Дегтярев В.В., Орлова Е.О., Шумкова М.Н., Яненко А.П. Обеспечение безопасности судопропуска в маловодный период навигации № 8

Файзиев Х., Хожиев Т., Хажиев И., Рахимов Ш. Численное решение краевой задачи неустановившейся фильтрации в грунтовых плотинах с учетом фильтрационной анизотропности грунтов методом конечных разностей № 7

Шлычков В.А., Дегтярев В.В. Обоснование параметров шугозащитных дамб у речных водозаборов с помощью численной модели плановых течений № 6

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

Авдеев Ю.В., Кононов А.Д., Кононов А.А., Варданян Н.А. Разработка функциональной схемы фазоразностной системы автоматического дистанционного управления группой технологических машин дорожно-строительного комплекса № 7

Воробьев В.С., Боброва Т.В., Попов А.М., Попова Ю.В. Управление поставками полипродукта при реализации строительных проектов в зонах индустриального освоения № 9

Калугин Ю.Б., Тупицын Р.Ю. Выбор работ для «сжатия» критического пути календарного графика № 2

Файзиев Х. Экспериментальные исследования уплотняемости дигидратного фосфогипса для строительства дамб гидроотвала № 5

СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ

Гладких В.А., Королев Е.В. Усталостная долговечность сероасфальтобетона № 3

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Малышева Ю.Э., Грузин В.В. Возможные рабочие процессы и зависимости между основными геометрически-

ми и энергетическими параметрами дроссельных пневмоударных механизмов № 4

Малышева Ю.Э., Абраменков Д.Э., Дедов А.С., Малышев М.С., Абраменков Э.А. Классификационные признаки-элементы цилиндра-корпуса пневматических ударных механизмов № 1

Семикопенко И.А., Воронов В.П., Юрченко А.С. Расчет мощности классифицирующего устройства дезинтегратора № 2

Тюменцев Е.Ю., Гаврильчик Г.Р., Малышев М.С., Кварцхалая Т.Р., Гвоздев В.А., Абраменков Э.А. Дроссельный пневмоударный механизм с частичным вытеснением воздуха из камеры рабочего хода посредством трубы и стержня с внутренним каналом № 2

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ, ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКОЛОГИИ

Амирханян М.З., Брюхань Ф.Ф., Кучмин А.В. Натурные измерения электромагнитных полей с частотой 50 Гц в составе инженерно-экологических изысканий № 2

Герасимов А.П. Западноевропейский модерн и неоромантические тенденции в деревянной архитектуре сибирских городов № 5

Гудков А.А., Невзгодин И.В., Ростовцева И.Л. Формирование корпуса профессиональных архитектурно-градостроительных кадров в Сибири в конце XVIII – первой половине XIX века № 4

Завыленков С.А. О классификации помещений многофункциональных жилых комплексов № 10

Копылова Т.А. Теоретическое обоснование шкалы уровней обслуживания интермодальных узлов городского общественного пассажирского транспорта № 9

Лежава И.Г., Мелодинский Д.Л., Новиков В.А. Форма, конструкция, материал № 8

Лихачева А.Е. Особенности эволюции архитектурно-планировочных типов крестьянских фермерских хозяйств № 10

Молодин А.В. К вопросу комфортных температурных условий эксплуатации традиционного чукотского жилища в условиях Крайнего Севера. Часть 1 № 6

Молодин А.В. К вопросу комфортных температурных условий эксплуатации традиционного чукотского жилища в условиях Крайнего Севера. Часть 2 № 7

Молодин А.В. Планировка и застройка крупнейших поселений Русской Америки первой половины XIX века. Часть 1 № 4

Молодин А.В. Планировка и застройка крупнейших поселений Русской Америки первой половины XIX века. Часть 2 № 5

Сазонов Э.В., Смольянинов В.В. ТERRITORIAlное планирование пригородных зон (градостроительно-правовой аспект) № 7

Смолина О.О. Способы повышения экоустойчивости урбанизированных территорий № 11–12

Талапов В.В. Об общей схеме информационной модели объекта строительства № 1

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Аркаев М.А., Жаданов В.И. Расчет односрезных соединений на витых крестообразных нагелях при усилении деревянных конструкций путем увеличения поперечного сечения № 2

- Багоутдинова А.Г., Золотоносов Я.Д.** Расчет и оценка эффективности змеевиковых теплообменников типа «труба в трубе» с изменяющимся радиусом изгиба винтовой спирали № 1
- Байер В.Е., Ефимов А.В., Максимов О.Г.** Материаловедение для архитекторов № 8
- Богданов В.С., Богданов Н.Э., Гаврунов А.Ю., Ельцов М.Ю., Карагодина К.И.** Кинематика измельчения материала в вибрационной мельнице № 3
- Бокарев С.А., Карапулов А.М., Королев К.В., Ефимов С.В.** Обоснование методики расчета продольного борта балластного корыта железобетонных пролетных строений № 4
- Воробьев В.С., Ланис А.Л., Попова Ю.В.** Оптимальное управление поставками и запасами материальных ресурсов на строительстве линейно-распределенных объектов № 7
- Герасимов С.И., Жилкин В.А., Попов А.М.** Повышение точности измерения перемещений поверхности деформируемых объектов по способу компенсации интерференционных полос в контактном голограмическом интерферометре № 10
- Герасимов С.И., Зиновьев В.Б., Попов А.М.** Экспериментально-расчетный метод учета нагрева тензодатчика при измерении деформации элементов конструкций № 6
- Гребенюк Г.И., Пуртов В.В., Павлик А.В., Кулешова Н.И.** Расчет предельных нагрузок на односрезные нагельные соединения растянутых деревянных элементов с использованием решений формируемых условно-экстремальных задач № 6
- Енджиевский Л.В., Кудрин В.Г., Себешев В.Г.** Оценка отечественной нормативной базы обеспечения механической безопасности сооружений № 4
- Зиганшин А.М., Беляева Е.Э., Соколов В.А.** Снижение потерь давления при профилировании острого отвода и отвода с нишней № 1
- Калугин Ю.Б., Клыков М.С., Тушицын Р.Ю.** Особенности применения двойственного графа для определения минимального разреза сетевой модели № 6
- Канушин В.Ф., Ганагина И.Г., Косарев Н.С., Голдобин Д.Н.** К вопросу о необходимости учета неприливных изменений силы тяжести при деформационном мониторинге гидротехнических сооружений № 11–12
- Королев К.В., Карапулов А.М., Галтер Д.С.** Инженерная методика расчета вертикально армированных оснований № 9
- Кошелева О.Э., Паули И.А., Николаев Н.Ю.** Изучение термодеструкции древесины после обработки химическими реагентами № 2
- Кузнецов А.О., Королев К.В., Полянкин Г.Н., Карапулов А.М.** Предельное давление армированного грунта на ограждающие конструкции № 10
- Макеев С.А., Краснощеков Ю.В., Соколовский З.Н.** Инженерная методика анализа пространственного деформирования упругих прямых стержней с учетом геометрической нелинейности № 11–12
- Мукашев А.М., Абрамчук С.И., Пуговкин А.В., Бойченко А.В., Купревиков С.В., Абушкин Д.В.** Аппаратно-программный комплекс учета потребляемой тепловой энергии № 3
- Назиров Р.А., Лямзина П.В.** Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности сибирской сосны № 5

- Нуждин Л.В., Павлюк К.В.** Учет влияния деформационной анизотропии грунта при расчете осадок фундаментов № 6
- Преловская Е.С., Левашев А.Г., Михайлов А.Ю., Кламер М.** Совершенствование методики проектирования улично-дорожных сетей российских городов № 9
- Смолин Ю.П., Караполов А.М., Востриков К.В.** Решение задачи об определении осадки водонасыщенного анизотропного грунта, уплотняемого в условиях компрессии № 6
- Фролова В.А., Адегова Л.А., Раевская Г.А.** Оценка влияния процессов деформирования на усталостную долговечность алюминиевых сплавов № 3
- Хахалев П.А., Воробьев Н.Д., Богданов В.С.** Исследование малоподвижного ядра мелющей загрузки в шаровой барабанной мельнице № 2
- Чапаев Д.Б., Рафальская Т.А.** Математическое описание зависимости растворимости магнетита от температуры и водородного показателя теплосетевой воды для применения в расчете интенсивности внутреннего коррозионного износа № 3

В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

- Гребенюк Г.И., Пуртов В.В., Павлик А.В., Кулешова Н.И.** Экспериментальные исследования соединений деревянных элементов на металлических пластинах и дюбелях, усиленных штампованными зубчатыми шайбами при действии кратковременных нагрузок № 4

ДОСТИЖЕНИЯ НАУКИ – ПРОИЗВОДСТВУ

- Саргсян А.Е., Гукова Е.Г.** Обоснование сейсмостойкости строительных конструкций здания резервной дизельной электростанции № 11–12

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

- Меерович М.Г.** Деревянное наследие Томска № 10

Памяти Дмитрия Георгиевича Копаницы, выдающегося ученого и педагога № 6

ПОЛУЧЕНИЕ КЕРАМЗИТА НА ОСНОВЕ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ И СИЛИКАТНОГО ВЯЖУЩЕГО

В России при сжигании твердого топлива – углей, сланцев, торфа – образуется около 25 млн т в год отвалов золошлаковых смесей, из которых только 8 % используется в качестве добавок при производстве строительных материалов. В Институте химии твердого тела и механохимии СО РАН г. Новосибирска совместно с Новосибирским государственным техническим университетом проведены фундаментальные исследования с целью получения из золошлаковых отходов (ЗШО) металлургических предприятий и теплоэлектростанций теплоизолирующего материала – керамзита; в качестве вяжущего компонента, способного вспучиваться при термообработке, использовано жидкое стекло. Экспериментальным путем было установлено, что физико-механические свойства керамзита на основе ЗШО, в зависимости от технологических условий получения (продолжительности предварительной сушки гранул; температуры обжига; дисперсности золошлаковых материалов) можно варьировать в широких пределах.

- Размер гранул керамзита составляет 10–15 мм
- Каждящаяся плотность гранул – $0,43\text{--}1,13 \text{ г}/\text{см}^3$
- Прочность при раскалывании гранул – 8,0–76,8 МПа
- Керамзит, полученный на основе золошлаковых отходов, не уступает по прочностным показателям промышленному керамзиту (согласно ГОСТ 9757–90) и имеет аналогичную мелкопористую структуру.

За консультацией можно обращаться к разработчикам.

РАЗРАБОТЧИКИ:

ПОЛУБОЯРОВ Владимир Александрович, д-р хим. наук, проф.;
E-mail: v.a.poluboyarov@ngs.ru

Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск
Новосибирский государственный технический университет

КОРОТАЕВА Зоя Алексеевна, канд. хим. наук; E-mail: z.korotaeva@ngs.ru
Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск

ВОЛОСКОВА Елена Владимировна, канд. хим. наук;
E-mail: lenavoloskova@ya.ru

Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск
ГОРБУНОВ Федор Константинович, канд. техн. наук, доп.;
E-mail: f1123723@yandex.ru

Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск
Новосибирский государственный технический университет

ЖДАНОК Александр Александрович, инж.;
E-mail: aleksandr-jdanok@rambler.ru

Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск
БУЛГАКОВ Виктор Владимирович, ведущий инж.

Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск

ГУСЕВ Кирилл Петрович, ст. препод.; E-mail: k.gusev@corp.nstu.ru
Новосибирский государственный технический университет

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
«СТРОИТЕЛЬСТВО»

Издаётся с марта 1958 г.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, вступивший в силу с 1 декабря 2015 г.; входит в международную базу данных CA(pt) (Chemical Abstracts).

В журнале публикуются статьи, содержащие новые результаты научных исследований теоретического и прикладного характера, обзорные статьи по состоянию, научным проблемам и перспективам развития теории архитектуры, строительных наук и строительной отрасли, рецензии на книги, научно-техническая информация. Авторы и читатели журнала – научно-педагогические работники, аспиранты, студенты старших курсов строительных вузов, сотрудники научно-исследовательских и проектных институтов, строительных организаций и предприятий.

ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ ЖУРНАЛА:

- Теория сооружений
- Строительные конструкции, здания и сооружения. Основания и фундаменты
- Строительные материалы и изделия
- Инженерные системы жизнеобеспечения населенных мест, зданий и сооружений. Экологическая безопасность строительства
- Гидroteхническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология
- Технология и организация строительства
- Научные проблемы архитектуры, градостроительства и экологии
- Научно-методический раздел
- В лабораториях вузов
- Достижения науки – производству
- Научно-техническая информация

Принимается подписка
на 2-е полугодие по каталогу «Роспечать» 2017 г.

Каталожная цена за 6 месяцев – 4200 р.
Цена отдельного номера – 700 р.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Для оформления научных статей по требованиям ВАК, РИНЦ, Scopus на сайте нашего журнала <http://izvuz.str.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 Pr., в конце – (in Russian).

Примеры оформления текста статей и REFERENCES – в рубрике «полнотекстовые версии статей».

Журнал публикует информацию о научно-технических разработках в области строительства объемом 1 с., включая 1–2 иллюстрации. Обязательны сведения о разработчиках: фамилия, имя, отчество полностью; звания; контактная информация, место работы.

Редакция имеет право на редакционную обработку статьи. Для контакта с редактором просим сообщать номер мобильного телефона одного из авторов (не для опубликования).

ББК 38
И 33
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО**

№ 11–12 (707–708) 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 26.12.17. Формат 70×108 $\frac{1}{16}$
Усл. печ. л. 9,8+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 6956

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