

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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 9 (717)
Сентябрь 2018 г.

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

П.А. Аббасов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ДВФУ, Владивосток
В.Н. Азаров, д-р техн. наук, проф., ВГТУ, Волгоград
А.А. Афанасьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИУ МГСУ, Москва
М.И. Бальзанников, д-р техн. наук, проф., СГЭУ, Самара
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
А.М. Карапулов, д-р техн. наук, проф., СГУПС, Новосибирск
В.И. Колчунов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ЮЗГУ, 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., КазМИРР, Караганда, Казахстан
Ю.П. Панибратов, акад. РААСН, д-р экон. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург
А.И. Полищук, д-р техн. наук, проф., КубГАУ, Краснодар
Г.И. Пустоветов, чл.-кор. РААСН, д-р архитектуры, проф., НГУАДИ, Новосибирск
Н.А. Сапрыкина, поч. чл. РААСН, д-р архитектуры, проф., МАРХИ, Москва
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
И.С. Соболь, д-р техн. наук, проф., ННГАСУ, Нижний Новгород
Ю.А. Феофанов, д-р техн. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург
Й.В. Ху, PhD, проф., Национальный университет г. Инчхон, Республика Корея
Н.А. Цветков, д-р техн. наук, проф., ТГАСУ, Томск
Е.М. Чернышов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ВГТУ, Воронеж
В.Р. Чупин, д-р техн. наук, проф., ИНИТУ, Иркутск
Е.Ч. Шин, PhD, проф., Национальный университет г. Инчхон, Республика Корея
М.В. Шитикова, д-р физ.-мат. наук, проф., ВГТУ, Воронеж

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ СООРУЖЕНИЙ

Адищев В.В., Иванов А.И., Петрова О.В., Мальцев В.В. Применение нелинейных диаграмм деформирования бетона для расчета внерадиально сжатых железобетонных колонн	5
---	---

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ

Стаценко Н.В. Численное исследование напряженно-деформированного состояния двухпролетных железобетонных балок	20
---	----

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Низина Т.А., Чернов А.Н., Низин Д.Р., Горенкова А.И. Анализ совместной работы наполненных микрокальцитом полимерных покрытий с бетонными основаниями	32
--	----

Абдрахимов В.З. Исследование структурно-реологических свойств керамических масс, физико-механических свойств и текстуры керамического кирпича на основе горючих сланцев	43
---	----

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

Малаявина Е.Г., Фролова А.А. Экономическое обоснование выбора теплозащиты офисных зданий	56
--	----

Мартынов П.О., Ахмерова Г.М., Золотоносов Я.Д., Багоутдинова А.Г. Эффективность и перспективы применения секционного змеевикового водоподогревателя в системе индивидуального теплового пункта	66
--	----

Махинов А.Н., Шевцов М.Н., Головкин С.С., Махинова А.Ф., Голяченко С.Ю. Экологические последствия эксплуатации отстойников горно-добывающих предприятий	75
---	----

Хецуриани Е.Д., Бондаренко В.Л., Хецуриани Т.Е. Оценка главенствующей роли системной целостности в обеспечении экологической безопасности в зонах влияния водозаборного технологического комплекса городского хозяйства	83
---	----

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

Себелев И.М., Дугэрсурэн Э., Титов М.М., Карасёв Н.П. Кинетика прочности бетона на российских и монгольских цементах при различных температурах твердения	91
---	----

ДОСТИЖЕНИЯ НАУКИ – ПРОИЗВОДСТВУ

Авдеев Ю.В., Кононов А.Д., Кононов А.А., Варданян Н.А. К вопросу использования дискретных команд в устройствах дистанционного управления группой технологических машин дорожно-строительного комплекса	101
--	-----

THE MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER
EDUCATION OF RUSSIAN FEDERATION
INTERNATIONAL PUBLIC ORGANIZATION
“ASSOCIATION OF EDUCATIONAL
CIVIL ENGINEERING INSTITUTIONS”

**NEWS OF HIGHER EDUCATIONAL
INSTITUTIONS**

CONSTRUCTION

No. 9 (717)
September 2018

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

EDITORIAL BOARD

- P.A. Abbasov, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Vladivostok, Russia
V.N. Azarov, DSc (Eng), Prof., Volgograd, Russia
A.A. Afanas'yev, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow, Russia
M.I. Bal'zannikov, DSc (Eng), Prof., Samara, 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'ev, DSc (Eng), Prof., Volgograd, Russia
A.M. Karaulov, DSc (Eng), Prof., Novosibirsk, Russia
V.I. Kolchunov, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Kursk, Russia
V.I. Kostin, DSc (Eng), Prof. (*Deputy Editor-in-Chief*), Novosibirsk, Russia
G.B. Lebedev, PhD, Ass. Prof. (*Deputy Editor-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, Cor. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Saint-Petersburg, Russia
Zh.S. Nuguzhinov, DSc (Eng), Prof., Karaganda, Kazakhstan
Yu.P. Panibratov, Acad. RAACS, DSc (Econ), Prof., Saint-Petersburg, Russia
A.I. Polishchuk, DSc (Eng), Prof., Krasnodar, Russia
G.I. Pustovetov, Cor. Mem. RAACS, DSc (Architecture), Prof., Novosibirsk, Russia
N.A. Saprykina, Hon. Mem. RAACS, DSc (Architecture), Prof., Moscow, Russia
V.G. Sebeshev, Hon. Mem. RAACS, PhD, Prof. (*Editor-in-Chief*), Novosibirsk, Russia
Yu.L. Skolubovich, Cor. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Novosibirsk, Russia
I.S. Sobol', DSc (Eng), Prof., Nizhniy Novgorod, Russia
Yu.A. Feofanov, DSc (Eng), Prof., Saint-Petersburg, Russia
Jong Wan Hu, PhD, Prof., Incheon National University, Republic of Korea
N.A. Tsvetkov, DSc (Eng), Prof., Tomsk, Russia
Ye.M. Chernyshov, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Voronezh, Russia
V.R. Chupin, DSc (Eng), Prof., Irkutsk, Russia
Eun Chul Shin, PhD, Prof., Incheon National University, Republic of Korea
M.V. Shitikova, DSc (Eng), Prof., Voronezh, Russia

Responsible secretary N.V. Bitkina

The editorial office's address: 113 Leningradskaya St. Novosibirsk 630008 Russia;
Phone number +7 (383) 266 28 59; www.izvuzstr.sibstrin.ru; E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

CONTENTS

THEORY OF STRUCTURES

Adishchev V.V., Ivanov A.I., Petrova O.V., Mal'tsev V.V. Application of nonlinear diagrams of concrete deformation for calculation eccentrically compressed reinforced concrete column	5
--	---

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND STRUCTURES. BASES AND FOUNDATIONS

Statsenko N.V. Numerical research of stress-strain state in double-span reinforced concrete beams	20
---	----

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Nizina T.A., Chernov A.N., Nizin D.R., Gorenkova A.I. Analysis of joint work of microcalcite filled polymer coatings with concrete bases	32
--	----

Abdrakhimov V.Z. The study of structural and rheological properties of ceramic masses, physico-mechanical properties and texture of ceramic bricks on the basis of oil shale	43
--	----

LIFE MAINTENANCE ENGINEERING SYSTEM OF THE INHABITED LOCALITIES, BUILDINGS AND STRUCTURES. ECOLOGICAL SAFETY OF CONSTRUCTION

Malyavina E.G., Frolova A.A. Economic justification of the choice of the thermal protection of office buildings	56
---	----

Martynov P.O., Akhmerova G.M., Zolotonosov Ya.D., Bagoutdinova A.G. Efficiency and prospects of application of the sectional coil heater in the system of an individual heat point	66
--	----

Makhinov A.N., Shevtsov M.N., Golovkin S.S., Makhinova A.F., Golyachenko S.Yu. Environmental consequences of the exploitation hydrotechnical objects of mining enterprises	75
--	----

Khetsuriani E.D., Bondarenko V.L., Khetsuriani T.E. Assessment's primary role in ensuring environmental security in the zones of influence of water intake technology complex mulli-purpose systems of water supply of urban	83
--	----

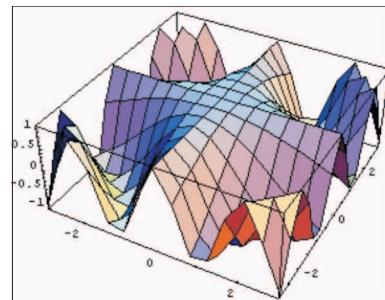
TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION

Sebelev I.M., Dugersuren E., Titov M.M., Karasev N.P. The kinetics of the concrete strength with russian and mongolian cements at different hardening temperatures reduction of advances in science to practice	91
---	----

REDUCTION OF ADVANCES IN SCIENCE TO PRACTICE

Avdeev Yu.V., Kononov A.D., Kononov A.A., Vardanyan N.A. To the problem of usage of discrete commands in the units of remote controlling a group of technological machines of the road-building complex	101
---	-----

ТЕОРИЯ СООРУЖЕНИЙ



УДК 624.012.45

В.В. АДИЩЕВ, А.И. ИВАНОВ, О.В. ПЕТРОВА, В.В. МАЛЬЦЕВ

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА ДЛЯ РАСЧЕТА ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН*

Рассмотрена математическая модель деформирования внецентренно сжатой железобетонной колонны. Построен алгоритм «сквозного» расчета от начала нагружения до начала разрушения с применением сплайн-аппроксимации и билинейной аппроксимации. Показано, что использование аппроксимаций диаграмм с ниспадающими ветвями и билинейных диаграмм не корректно для определения предельной нагрузки при малых эксцентричеситетах для бетонной и железобетонной колонны. Обнаружен эффект перераспределения напряжений, в результате которого колонны при малых эксцентричеситетах разрушаются по растянутой грани, которая изначально сжата. Расчеты, выполненные с использованием нелинейной сплайн-аппроксимации диаграммы деформирования бетона, сравниваются с расчетами, выполненными с использованием билинейной диаграммы. Определены ограничения на применение нелинейных диаграмм, следующие из корректности математической модели. Введены новые понятия: «аналитический суперэлемент», «метод аналитических подструктур».

Ключевые слова: железобетон, внецентренное сжатие, суперэлемент, сплайн-аппроксимация и билинейная аппроксимация, аналитический суперэлемент, метод аналитических подструктур.

DOI 10.32683/0536–1052–2018–717–9–5–19

В последнее десятилетие появилось большое количество расчетных комплексов (ANSYS, SAMTECH, Лира и др.) для решения задач механики деформированного твердого тела, основанных на использовании метода конечных элементов (МКЭ). Возможность конечно-элементного моделирования позволяет эффективно решать задачи большой размерности. Расчетные комплексы на базе МКЭ широко используются при расчете и проектировании строительных сооружений. В работе [1] отмечалось, что если рассчитываемая система слишком громоздка, то более рационально организовать рекурсивный расчет с расчленением всей системы

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-08-0097516).

на подсистемы – суперэлементы. Этот прием может оказаться удачным, когда расчленение на подсистемы происходит естественно: например, здание из объемных блоков (объемный блок – суперэлемент) или диафрагма высотного здания, собирающаяся из отдельных панелей (панель – суперэлемент).

Основная идея метода суперэлементов (метод подструктур), сформулированная Е.С. Пржеминицким [2], К. Мейнером [3], Р.П. Федоренко [4] и др., состоит в независимости расчета отдельных суперэлементов (подструктур) с помощью МКЭ и последующего учета их взаимодействия. Расчет сложной системы можно выполнить обычным способом: нанести необходимую сетку и рассчитать всю систему целиком. Однако большое количество расчетных узлов, элементов, неизвестных перемещений может сильно затруднить решение задачи. Используя суперэлементы, можно провести расчет поэтапно, существенно снизив на каждом этапе размерность задачи. Реализация метода суперэлементов (МСЭ) достаточно подробно описана в работе [1]. Автор предлагает конечно-элементную дискретизацию всех суперэлементов. Расчет системы, набранной из суперэлементов, аналогичен обычной процедуре МКЭ.

При расчете железобетонных конструкций одним из основных условий адекватности расчета является учет нелинейности деформирования бетона при нагружении. В работе [1] предлагается учитывать физическую нелинейность с помощью применения метода суперэлементов. Предлагается процедура построения матрицы жесткости стержня. Изменение жесткостных характеристик сечений по длине обусловлено нелинейной работой материала и изменением усилий по длине стержня. То есть в действительности стержень (ригель или колонна) из неупругого материала представляется в виде упругого стержня с переменными жесткостями. Чтобы учесть нелинейность, необходимо по длине стержня вводить промежуточные узлы, что резко увеличивает размерность решаемой задачи.

В настоящее время формируется другой подход к разработке гибридных численно-аналитических методов расчета [5, 6], позволяющих создавать численно-аналитические алгоритмы «сквозных» расчетов для определения деформированного состояния в изгибаемых, сжатых и сжато-изогнутых железобетонных элементах. В рамках модифицированного метода подструктур («метод аналитических подструктур») ригели и колонны, а также их совокупности в виде рам рассчитываются как «аналитические суперэлементы». При этом напряженно-деформированное состояние (НДС) в «аналитических суперэлементах» определяется не методом конечных элементов, а численно-аналитическим методом, т.е. решением системы алгебраических уравнений равновесия и кинематических соотношений. Идея модифицированного метода подструктур заключается в проведении расчета не для всей конструкции в целом, а для совокупности иерархически связанных конструктивных элементов в виде «аналитических суперэлементов», объединяющихся в полную конструкцию с использованием МКЭ.

В данной работе рассматривается задача о внецентренном сжатии железобетонного стержня (колонны) с учетом физической нелинейности бетона и арматуры. Исследуется возможность определения напряженно-деформи-

рованного состояния в сжатой железобетонной колонне с применением нелинейных диаграмм деформирования. В 2012 г. введены актуальные в настоящее время нормы проектирования железобетонных конструкций в виде свода правил (СП 63.13330.2012 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения»). Одним из обязательных этапов проектирования изгибаемых железобетонных конструкций является расчет, который рекомендуется выполнять по двум группам предельных состояний или по нелинейной деформационной модели. Расчет по двум группам предельных состояний игнорирует реальные физические свойства бетона, а также не учитывает особенности напряженно-деформированного состояния и физически адекватные условия перехода из одного состояния в другое. «Сквозной» расчет от начала нагружения до потери несущей способности железобетонного элемента в рамках такого подхода невозможен по следующим причинам. Переход из стадии «до образования трещин» в стадию «после образования трещин» обусловливается достижением деформацией крайнего растянутого волокна бетона предельного значения, величина которого весьма условна и, вообще говоря, зависит от различных факторов, в том числе от градиента изменения напряженно-деформированного состояния [7, 8]. Образование трещин при растяжении и разрушение в сжатой зоне происходят, если в некотором объеме материала уровень накопленных микроповреждений достигает своего критического значения. Определение условий перехода из эксплуатационной стадии в стадию разрушения – сложнейшая и нерешенная задача теории железобетона.

В качестве альтернативы методам расчета по предельным состояниям В.М. Митасовым и В.В. Адищевым был предложен подход к расчету изгибаемых железобетонных элементов с использованием энергетических соотношений [5]. При оценке несущей способности, жесткости и трещиностойкости железобетонного элемента интерес представляет изменение НДС от начала нагружения до образования трещин и потери несущей способности. Проблема физически адекватного описания напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций на всех стадиях нагружения выходит на первый план. Каждой из стадий деформирования должна соответствовать математическая модель, содержащая уравнения равновесия, кинематические соотношения, аналитические аппроксимации диаграмм деформирования материалов, критерии прочности. Наличие такой иерархии моделей позволяет создать «сквозные» алгоритмы расчета железобетонных конструкций на прочность, жесткость и трещиностойкость.

Аналогичная ситуация проявляется при исследовании процесса деформирования внецентренно сжатого железобетонного элемента. Ниже рассматривается сжато-изогнутый железобетонный стержень, в расчетном сечении которого действует сила N , приложенная с малым эксцентризитетом e . Строго говоря, эксцентризитет зависит от поперечного перемещения расчетного сечения, но в данной работе эта зависимость не рассматривается, так как учет поперечных перемещений существенно усложняет математическую модель. Одно из уравнений становится интегральным, содержащим неизвестную

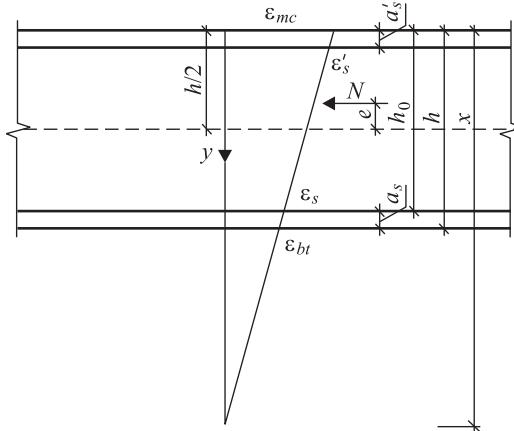


Рис. 1. Распределение деформаций по сечению
 ε_{mc} – деформация наиболее сжатого волокна; ε_{bt} – деформация менее сжатого волокна; ε_s – деформация менее сжатой арматуры; ε'_s – деформация наиболее сжатой арматуры

Уравнения равновесия запишем в виде:

$$\begin{cases} \int_{-h/2}^{h/2} b(y) \cdot \sigma_b(y) \cdot dy + A_s \cdot \sigma_s + A'_s \cdot \sigma'_s = N, \\ \int_{-h/2}^{h/2} b(y) \cdot \sigma_b(y) \cdot y \cdot dy - \left(\frac{h}{2} - a_s \right) \cdot A_s \cdot \sigma_s + \left(\frac{h}{2} - a'_s \right) \cdot A'_s \cdot \sigma'_s = N \cdot e, \end{cases} \quad (1)$$

где $\sigma_b(y)$ – функция распределения напряжений в бетоне по высоте сечения; σ_s, σ'_s – напряжение наименее сжатой или растянутой арматуры и наиболее сжатой арматуры соответственно;

h_0 – полезная высота сечения элемента;

a_s, a'_s – толщины защитного слоя бетона в зоне наименьшего сжатия или растяжения и наибольшего сжатия;

A_s, A'_s – площади сечений арматуры в зоне наименьшего сжатия или растяжения и наибольшего сжатия.

Для упрощения выкладок примем $b(y) = b = \text{const}$, система (1) принимает вид:

$$\begin{cases} b \cdot \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_b(y) \cdot dy + A_s \cdot \sigma_s + A'_s \cdot \sigma'_s = N, \\ b \cdot \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_b(y) \cdot y \cdot dy - \left(\frac{h}{2} - a_s \right) \cdot A'_s \cdot \sigma'_s + \left(\frac{h}{2} - a'_s \right) \cdot A_s \cdot \sigma_s = N \cdot e. \end{cases} \quad (2)$$

Из гипотезы плоских сечений следует кинематическое соотношение (рис. 1):

$$\frac{x - \frac{h}{2} - y}{\varepsilon} = \frac{x}{\varepsilon_{mc}} \quad \text{или} \quad y = x - \frac{h}{2} - \frac{x\varepsilon}{\varepsilon_{mc}},$$

где y – координата.

функцию поперечных перемещений. Основное внимание в данной работе уделяется корректности применения нелинейных диаграмм деформирования. Предполагается, что начало разрушения происходит при достижении нагрузкой предельного значения, соответствующего возникновению предельных деформаций сжатия или растяжения на гранях стержня.

Считается, что сечение железобетонного элемента высотой h симметрично и его ширина задается функцией $b(y)$. Распределение деформаций для прямоугольного сечения представлено на рис. 1.

Выполним замену переменных в системе уравнений (2):

$$y = x - \frac{h}{2} - \frac{x\varepsilon}{\varepsilon_{mc}}, \quad dy = -\frac{x}{\varepsilon_{mc}} d\varepsilon. \quad (3)$$

Система принимает вид:

$$\begin{cases} b \cdot \int_{\varepsilon_{mc}}^{\varepsilon_{bt}} \psi(\varepsilon) \cdot \frac{-x}{\varepsilon_{mc}} \cdot d\varepsilon + A_s \cdot \sigma_s + A'_s \cdot \sigma'_s = N, \\ b \cdot \int_{\varepsilon_{mc}}^{\varepsilon_{bt}} \psi(\varepsilon) \cdot \left(x - \frac{h}{2} - \frac{x\varepsilon}{\varepsilon_{mc}} \right) \cdot \frac{-x}{\varepsilon_{mc}} \cdot d\varepsilon - \left(\frac{h}{2} - a_s \right) \cdot A_s \cdot \sigma_s + \\ + \left(\frac{h}{2} - a'_s \right) \cdot A'_s \cdot \sigma'_s = N \cdot e. \end{cases} \quad (4)$$

Введем обозначения для аналитических выражений диаграммы деформирования арматуры $\sigma_s = \varphi(\varepsilon_s)$ и добавим кинематические соотношения, связывающие деформации арматуры и бетона (рис. 1). После преобразований система уравнений для расчета напряженно-деформированного состояния расчетного сечения внецентренно сжатого железобетонного стержня принимает вид:

$$\begin{cases} b \cdot \int_{\varepsilon_{mc}}^{\varepsilon_{bt}} \psi(\varepsilon) \cdot \frac{-x}{\varepsilon_{mc}} \cdot d\varepsilon + A_s \cdot \varphi(\varepsilon_s) + A'_s \cdot \varphi(\varepsilon'_s) = N, \\ b \cdot \left(\frac{x}{\varepsilon_{mc}} \right)^2 \cdot \int_{\varepsilon_{mc}}^{\varepsilon_{bt}} \psi(\varepsilon) \cdot \varepsilon \cdot d\varepsilon - (x - a_s) \cdot A_s \cdot \varphi(\varepsilon_s) - \\ - (x - h + a'_s) \cdot A'_s \cdot \varphi(\varepsilon'_s) = N \cdot \left(e - x + \frac{h}{2} \right), \\ \frac{\varepsilon_{bt}}{x - h} = \frac{\varepsilon_{mc}}{x}, \quad \frac{\varepsilon_s}{x - h_0} = \frac{\varepsilon_{mc}}{x}, \quad \frac{\varepsilon'_s}{x - a'_s} = \frac{\varepsilon_{mc}}{x}. \end{cases} \quad (5)$$

При внецентренном нагружении могут реализоваться две схемы разрушения в зависимости от эксцентрикитета приложения нагрузки. Первая схема реализуется при малых эксцентрикитетах: разрушающее сечение находится в состоянии сжатия, т. е. эпюра деформаций трапецидальная (деформации обеих граней отрицательны). Вторая схема реализуется при больших эксцентрикитетах: эпюра деформаций в разрушающем сечении двузначная, т.е. одна грань элемента сжата, другая растянута.

СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции» рекомендует использовать в расчетах диаграмму двухлинейную (Прандтля) или трехлинейную (рис. 2), а также криволинейную диаграмму Н.И. Карпенко.

Диаграмма деформирования растянутого бетона определяется по диаграммам, представленным на рис. 2, при этом расчетное сопротивление бетона сжатию R_b заменяют расчетным сопротивлением бетона растяжению R_{bt} .

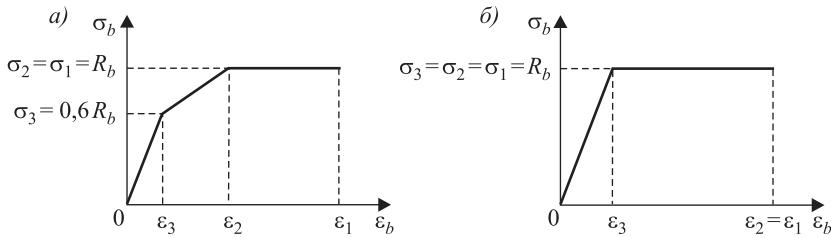


Рис. 2. Диаграмма деформирования сжатого бетона
а – трехлинейная; б – двухлинейная (Прандтля)

Аналитическая зависимость криволинейных диаграмм деформирования бетона (Н.И. Карпенко) принимается в виде:

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m v_m}, \quad d\varepsilon_m = \frac{d\sigma_m}{E_m v_m^k},$$

где ε_m , σ_m , E_m – деформации, напряжения, начальный модуль упругости; m – индекс материала (для сжатой зоны бетона индекс m заменяется на b , для растянутой – на bt);

v_m – коэффициент изменения секущего модуля, определяемый в соответствии с СП 63.13330.2012 (Приложение Г).

Известны работы, посвященные расчету внецентренно сжатых железобетонных стержней с применением нелинейных диаграмм [9–12]. В этих работах используются аналитические аппроксимации диаграмм в виде одной функции. Подбор по экспериментальным данным одной функции, адекватно аппроксимирующей зависимость напряжений от деформаций, – задача практически неразрешимая. Наиболее рационально применение аппроксимирующих сплайн-функций. В работе [6] для расчета железобетонной балки применена аппроксимация диаграммы деформирования бетона в виде простых сплайн-функций. Было показано, что результаты расчета балки с применением сплайн-ап-

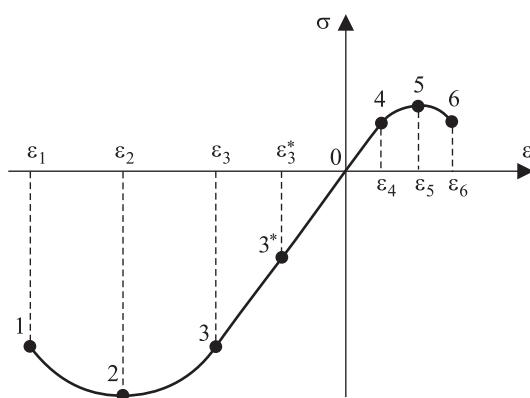


Рис. 3. Схематичная диаграмма деформирования бетона с узловыми точками

проксимации и диаграммы Н.И. Карпенко отличаются непринципиально. Схематично диаграмма деформирования бетона представлена на рис. 3.

Диаграмма растяжения – сжатия бетона (рис. 3) аппроксимируется на каждом из участков сплайн-функциями:

участок 1–2:

$$\sigma_b(\varepsilon) = \sigma_2 + b_2(\varepsilon_2 - \varepsilon)^{m_2};$$

участок 2–3:

$$\sigma_b(\varepsilon) = \sigma_3 + E_b(\varepsilon - \varepsilon_3) + b_3(\varepsilon_3 - \varepsilon)^{m_3};$$

участок 3–4:

$$\sigma_b(\varepsilon) = E_b \varepsilon;$$

участок 4–5:

$$\sigma_b(\varepsilon) = \sigma_4 + E_b(\varepsilon - \varepsilon_4) + b_4(\varepsilon - \varepsilon_4)^{m_4};$$

участок 5–6:

$$\sigma_b(\varepsilon) = \sigma_5 + b_5(\varepsilon - \varepsilon_5)^{m_5},$$

где E_b – начальный модуль упругости бетона;

$b_2, m_2, b_3, m_3, b_4, m_4, b_5, m_5$ – коэффициенты сплайнов, которые определяются из условий гладкой склейки сплайн-функций в узлах интерполяции.

Будем решать систему (5) со следующими исходными данными: сечение колонны 40×40 см; эксцентриситет приложения нагрузки варьируется от -5 до -1 см; материал колонны – бетон условного класса В20; арматура класса А400, μ_s – коэффициент армирования.

Расчет выполнен с использованием двух аппроксимаций диаграммы деформирования бетона: двухлинейной диаграммой и сплайн-аппроксимации (координаты узлов интерполяции взяты из работы [6]). Определение параметров двухлинейной диаграммы выполнялось с применением равенства площадей подграфиков сплайн-аппроксимации и двухлинейной диаграммы, что соответствует равенству удельных энергий деформирования при достижении деформациями предельных значений, т.е. в состоянии предразрушения. Общими параметрами диаграмм были приняты модуль Юнга и предельная деформация. Узлы аппроксимации для построения диаграммы бетона приведены в табл. 1.

Для бетонной колонны при $\mu_s = 0$ система уравнений (5) после простых преобразований принимает вид:

$$\begin{cases} -b \cdot \frac{h}{\varepsilon_{mc} - \varepsilon_{bt}} \cdot \int_{\varepsilon_{mc}}^{\varepsilon_{bt}} \psi(\varepsilon) \cdot d\varepsilon = N, \\ b \cdot \left(\frac{h}{\varepsilon_{mc} - \varepsilon_{bt}} \right)^2 \cdot \int_{\varepsilon_{mc}}^{\varepsilon_{bt}} \psi(\varepsilon) \cdot \varepsilon \cdot d\varepsilon = N \cdot \left(e - \frac{\varepsilon_{mc} \cdot h}{\varepsilon_{mc} - \varepsilon_{bt}} + \frac{h}{2} \right). \end{cases} \quad (6)$$

Таблица 1. Координаты узловых точек для построения диаграммы бетона

№ узла	Сплайн-аппроксимация		Двухлинейная аппроксимация	
	ε_i	σ_i , МПа	ε_i	σ_i , МПа
1	$-4,8 \cdot 10^{-3}$	-5,7	–	–
2	$-2,5 \cdot 10^{-3}$	-15	$-4,8 \cdot 10^{-3}$	-12,3683039
3	$-0,20 \cdot 10^{-3}$	-5,7	$-0,433975577 \cdot 10^{-3}$	-12,3683039
4	$0,03 \cdot 10^{-3}$	0,82	$0,0442134682 \cdot 10^{-3}$	1,20850146
5	$0,20 \cdot 10^{-3}$	1,35	$0,27 \cdot 10^{-3}$	1,20850146
6	$0,27 \cdot 10^{-3}$	0,80	–	–

Система (6) является нелинейной алгебраической системой с неизвестными ε_{bt} и ε_{mc} при заданной нагрузке N и эксцентриките e . Параметр x определяется из кинематического соотношения (третье уравнение системы (5)). Решение системы выполнялось в ПК Mathcad. Определить нагрузку, соответствующую достижению на одной из граней предельной деформации, для малых значений эксцентрикита системы (6) не позволяет. Как будет показано ниже, это является следствием некорректности математической постановки, а именно нелинейность диаграмм деформирования приводит к неединственности решений системы.

Для определения равновесных состояний были выполнены следующие расчеты. При заданных значениях эксцентрикита e и задаваемой монотонно возрастающей деформации ε_{mc} решалась система уравнений (6) и определялись нагрузка N и деформация ε_{bt} . Расчет продолжался до тех пор, пока на одной из граней деформации не достигали предельных значений, т. е. начиналось разрушение на растянутой или сжатой грани.

Результаты расчета представлены в виде графиков для сплайн-аппроксимиации (рис. 4, а) и для двухлинейной аппроксимации (рис. 4, б). Расчеты с применением сплайн-аппроксимиации показали, что при больших значениях эксцентрикита ($e > 5$ см) на одной из граней деформации растяжения возникают в самом начале процесса нагружения, а разрушение начинается по растянутой грани, если считать началом разрушения достижение на растянутой грани предельного значения деформации растяжения на диаграмме. Началу разрушения колонны по растянутой грани при $e = 5$ см соответствует нагрузка $N_5 = -1687$ кН. Неармированный бетонный стержень при увеличении нагрузки должен разрушиться, несущая способность его исчерпывается при нагрузке $N_5 = -1687$ кН.

Для малых эксцентрикитов, мало отличающихся от так называемого случайного эксцентрикита, характерна неединственность расчетных равновесных состояний. На рис. 4 графики имеют точки экстремума. Начиная с некоторого значения нагрузки, каждому значению нагрузки N соответствуют две пары значений деформаций на противоположных гранях. При $e = 1$ см и $e = 2$ см равновесные состояния, соответствующие убыванию по абсолютной величине нагрузки при возрастающих деформациях, не имеют физического смысла. То есть предельные нагрузки, соответствующие исчерпанию несущей способности, определяются координатами точек экстремума на графиках. При $e = 1$ см предельная нагрузка $N_1 = -2211$ кН, при $e = 2$ см предельная нагрузка $N_2 = -2060$ кН.

В табл. 2 приведены значения предельных нагрузок и соответствующих деформаций противоположных граней, полученных при решении системы

Таблица 2. Предельные нагрузки для бетонного стержня

$e, \text{ см}$	Сплайн-аппроксимация			Двухлинейная аппроксимация		
	ε_{mc}	ε_{bt}	$N_{\text{пред}}, \text{ кН}$	ε_{mc}	ε_{bt}	$N_{\text{пред}}, \text{ кН}$
1	-0,003	-0,00065	-2211	-0,0048	0,000027	-1878
2	-0,003	-0,00018	-2060	-0,0048	0,000265	-1781
5	-0,0025	0,00027	-1687	-0,00178	0,00027	-1485

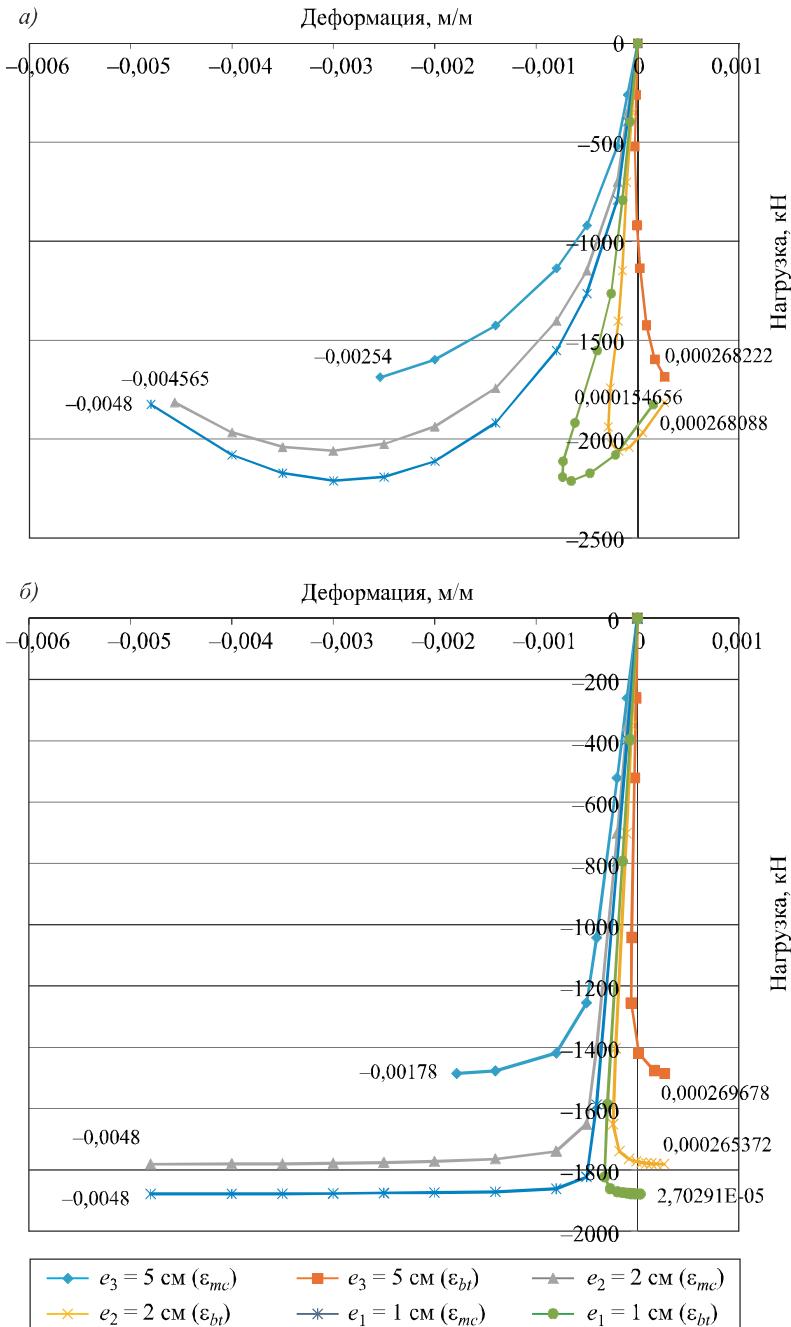


Рис. 4. Зависимость деформаций от нагрузки при различных эксцентрикитетах для бетонной колонны при расчете по сплайн-аппроксимации (а) и по двухлинейной диаграмме (б)

(6) с использованием сплайн-аппроксимации и двухлинейной аппроксимации. Расчет по двухлинейной аппроксимации дает несколько заниженные значения предельной нагрузки, но не позволяет адекватно определить, при каких деформациях достигаются предельные нагрузки. Отсюда можно сделать вывод, что замена диаграммы деформирования бетона,

имеющей экстремальные точки, двухлинейной диаграммой неэквивалентна. При расчете бетонного стержня на внецентренное нагружение при малых эксцентриситетах предпочтительно использовать сплайн-аппроксимиации.

Система уравнений (5) для железобетонной колонны путем простых преобразований приводится к виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} -b \cdot \frac{h}{\varepsilon_{mc} - \varepsilon_{bt}} \cdot I(\varepsilon_{mc}; \varepsilon_{bt}) + A_s \cdot \varphi \left(\varepsilon_{mc} - \frac{h_0}{h} (\varepsilon_{mc} - \varepsilon_{bt}) \right) + \\ + A'_s \cdot \varphi' \left(\varepsilon_{mc} - \frac{a'_s}{h} (\varepsilon_{mc} - \varepsilon_{bt}) \right) = N, \\ b \cdot \left(\frac{h}{\varepsilon_{mc} - \varepsilon_{bt}} \right)^2 \cdot K(\varepsilon_{mc}; \varepsilon_{bt}) - \left(\frac{\varepsilon_{mc} \cdot h}{\varepsilon_{mc} - \varepsilon_{bt}} - a_s \right) \times \\ \times A_s \cdot \varphi \left(\varepsilon_{mc} - \frac{h_0}{h} (\varepsilon_{mc} - \varepsilon_{bt}) \right) - \left(\frac{\varepsilon_{mc} \cdot h}{\varepsilon_{mc} - \varepsilon_{bt}} - h + a'_s \right) \times \\ \times A'_s \cdot \varphi' \left(\varepsilon_{mc} - \frac{a'_s}{h} (\varepsilon_{mc} - \varepsilon_{bt}) \right) = N \cdot \left(e - \frac{\varepsilon_{mc} \cdot h}{\varepsilon_{mc} - \varepsilon_{bt}} + \frac{h}{2} \right), \\ \frac{\varepsilon_{bt}}{x-h} = \frac{\varepsilon_{mc}}{x}, \quad \frac{\varepsilon_s}{x-h_0} = \frac{\varepsilon_{mc}}{x}, \quad \frac{\varepsilon'_s}{x-a'_s} = \frac{\varepsilon_{mc}}{x}, \end{array} \right. \quad (7)$$

где $I(\varepsilon_{mc}; \varepsilon_{bt}) = \int_{\varepsilon_{mc}}^{\varepsilon_{bt}} \psi(\varepsilon) \cdot d\varepsilon$; $K(\varepsilon_{mc}; \varepsilon_{bt}) = \int_{\varepsilon_{mc}}^{\varepsilon_{bt}} \psi(\varepsilon) \cdot \varepsilon \cdot d\varepsilon$.

Диаграмма деформирования арматуры не приводится, так как в момент достижения деформациями бетона предельных значений деформации арматуры соответствуют линейно-упругому закону: $\varphi(\varepsilon_s) = E_s \varepsilon_s$, модуль упругости стали $E_s = 200\,000$ МПа, $\sigma_{02} = 400$ МПа.

Армирование колонны 40×40 см (рис. 5) представлено в табл. 3.

Алгоритм проведения расчета железобетонной колонны аналогичен алгоритму расчета бетонной колонны. Результаты расчета представлены на рис. 6.

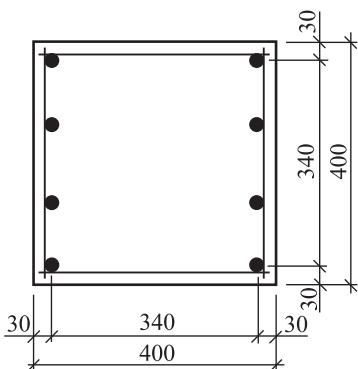


Рис. 5. Сечение железобетонной колонны 40×40 см

Таблица 3. Армирование колонны 40×40 см

Площадь сечения, см ²	1600
Армирование	8×d20
Площадь арматуры, см ²	25,13
Коэффициент армирования μ_s	0,0157
Защитный слой, мм	20
Расстояние до центра тяжести арматуры, мм	30

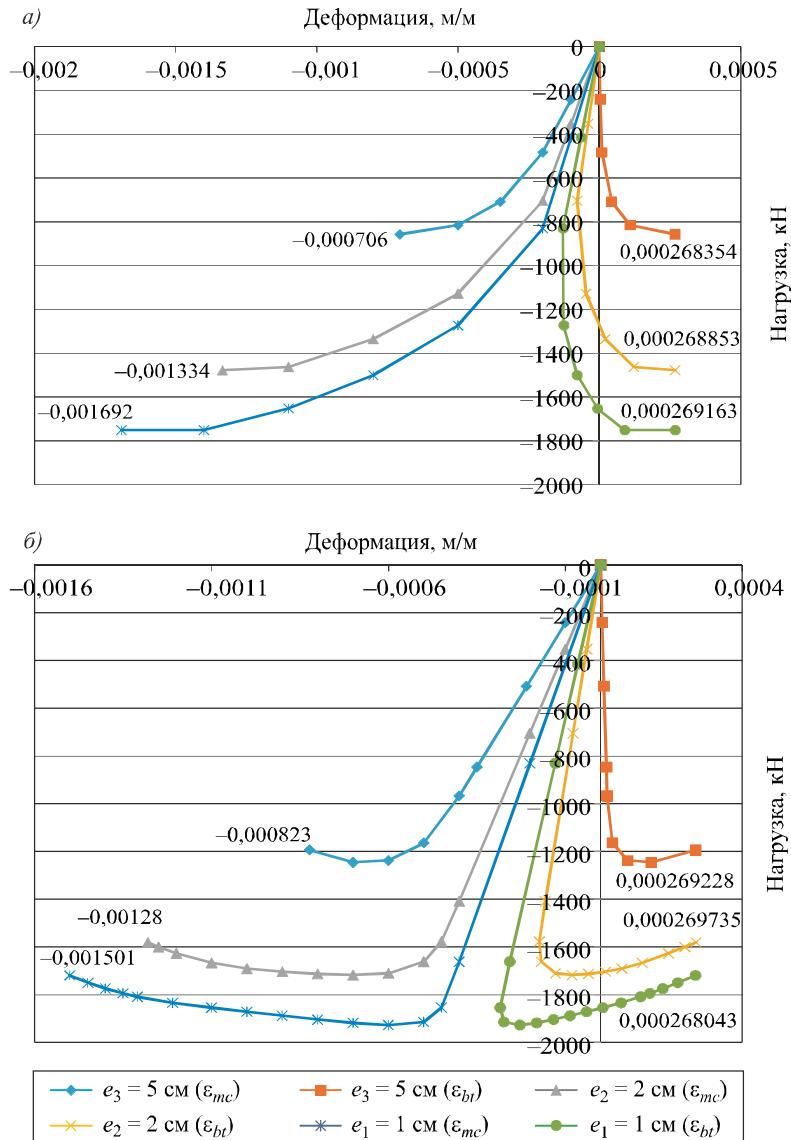


Рис. 6. Зависимость деформаций от нагрузки при различных эксцентрикитетах для железобетонной колонны при расчете по сплайн-аппроксимации (а) и по двухлинейной диаграмме (б)

Расчеты с использованием сплайн-аппроксимации и двухлинейной аппроксимации показали, что неединственность равновесных состояний возникает только при использовании двухлинейной аппроксимации. При этом расчетные предельные нагрузки оказываются завышенными по сравнению с нагрузками, полученными с использованием сплайн-аппроксимации, а соответствующие деформации не достигают предельных значений (табл. 4). Отсюда следует, что двухлинейную аппроксимацию использовать некорректно при определении предельных нагрузок.

Предельные нагрузки, определенные с использованием сплайн-аппроксимации, соответствуют началу разрушения по растянутой грани, но при

Т а б л и ц а 4. Предельные нагрузки для железобетонного стержня

e, см	Сплайн-аппроксимация			Двухлинейная аппроксимация		
	ε_{mc}	ε_{bt}	$N_{\text{пред}}, \text{kH}$	ε_{mc}	ε_{bt}	$N_{\text{пред}}, \text{kH}$
1	-0,0016	0,00027	-1751	-0,0006	0,00022	-1927
2	-0,0013	0,00027	-1479	-0,0007	-0,00008	-1717
5	-0,0007	0,00027	-857	-0,0007	0,00014	-1245

этом несущая способность колонны не исчерпывается, так как деформации сжатой грани в несколько раз меньше предельных деформаций сжатия. Расчет при нагрузках, превышающих значения, приведенные в табл. 4, не может быть выполнен с применением математической модели (7), так как кинематические соотношения, связывающие деформации бетона и арматуры, перестают быть верными, теряют физический смысл.

Для определения нагрузок, при которых в колонне возникают трещины на растянутой грани, но несущая способность не исчерпана, необходимо построение математических моделей, позволяющих рассчитать глубину трещины, процесс развития трещины при возрастании нагрузки. Для процесса образования и стабилизации трещин в изгибающем железобетонном элементе иерархия такого типа моделей построена в работах [5, 6].

Заключение. Рассмотрена математическая модель деформирования внецентренно сжатой железобетонной колонны в виде системы уравнений равновесия, кинематических соотношений, диаграмм деформирования. Построены алгоритмы решения системы с применением сплайн-аппроксимации и билинейной аппроксимации. Результаты, полученные с использованием нелинейной сплайн-аппроксимации диаграммы деформирования бетона, сравниваются с расчетами, выполненными с использованием билинейной диаграммы. Показано, что применение билинейных аппроксимаций диаграмм некорректно для определения предельных нагрузок при малых эксцентриситетах для бетонной и железобетонной колонн. Обнаружен эффект перераспределения напряжений при возрастании нагрузки. С увеличением нагрузки при малых эксцентриситетах происходит перестройка эпзор напряжений и деформаций на менее сжатой грани. Начало разрушения стержня при малых эксцентриситетах происходит по растянутой грани, которая изначально сжата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Г о р о д е ц к и й А.С. Возможности применения суперэлементов при решении различных задач строительной механики // Строит. механика и расчет сооружений. 2015. № 4. С. 51–56.
- П р ж е м и н и ц к и й Е.С. Матричный метод исследования конструкций на основе анализа подструктур // Ракетная техника и космонавтика. 1963. № 1. С. 165–174.
- М ей с н е р К. Алгоритм многосвязного объединения для метода жесткостей структурного анализа // Ракетная техника и космонавтика. 1968. № 11. С. 153–162.
- Ф е д о р е н к о Р.П. Введение в вычислительную физику. Долгопрудный: Изд. Дом «Интеллект», 2008. 504 с.

5. Адищев В.В., Митасов В.М. Энергетический подход к моделированию процесса образования трещин в изгибающихся железобетонных элементах // Изв. вузов. Строительство. 2005. № 4. С. 26–31.
6. Адищев В.В., Мальцев В.В. Применение нелинейных диаграмм деформирования бетона для расчета напряженно-деформированного состояния в железобетонной балке численно-аналитическим методом // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 1. С. 5–17.
7. Адищев В.В., Березина Э.В., Ершова Н.В. Определение коэффициентов трансформации эталонных диаграмм для изгибающихся и внецентренно сжатых железобетонных элементов // Изв. вузов. Строительство. 2011. № 7. С. 73–81.
8. Адищев В.В., Березина Э.В., Ершова Н.В. Экспериментальная апробация метода трансформации эталонных диаграмм деформирования бетона при изгибе // Изв. вузов. Строительство. 2011. № 8–9. С. 118–124.
9. Мураскин Г.В., Мордовский С.С. Применение диаграмм деформирования для расчета несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов // Жил. стр-во. 2013. № 3. С. 38–40.
10. Старишко И.Н. Способы определения несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов // Вестн. МГСУ. 2014. № 4. С. 59–69.
11. Старишко И.Н. Методика расчета несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов: анализ и предложения по ее совершенствованию // Вестн. МГСУ. 2014. № 3. С. 107–116.
12. Никulin A.I. К уточнению величин предельных относительных деформаций бетона в сжатой зоне изгибающихся железобетонных элементов // Пром. и гражд. стр-во. 2014. № 8. С. 12–15.

Адищев Владимир Васильевич, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: adishch@mail.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Иванов Андрей Игоревич, асп.;

E-mail: ai722@yandex.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Петрова Ольга Викторовна, магистр; E-mail: pamaleo@yandex.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Мальцев Виктор Васильевич, асп.; E-mail: malcevviktor91@yandex.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 06.08.18

Adishchev Vladimir Vasil'evich, DSc, Professor; E-mail: adishch@mail.ru

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

Ivanov Andrey Igorevich, Post-graduate Student; E-mail: ai722@yandex.ru

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

Petrova Ol'ga Viktorovna, MSc; E-mail: pamaleo@yandex.ru

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

Mal'tsev Viktor Vasil'evich, Post-graduate Student;

E-mail: malcevviktor91@yandex.ru

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

APPLICATION OF NONLINEAR DIAGRAMS OF CONCRETE DEFORMATION FOR CALCULATION ECCENTRICALLY COMPRESSED REINFORCED CONCRETE COLUMN

A mathematical model of deformation of an eccentrically compressed iron-concrete column is considered. An algorithm of «through» calculation from the beginning of loading

to the beginning of destruction with the use of spline approximation and bilinear approximation is constructed. It is shown that the use of approximations of diagrams with falling branches and bilinear diagrams is not correct for determining the maximum load at small eccentricities for a concrete and reinforced concrete column. The effect of redistribution of stresses is revealed, as a result of which the columns with small eccentricities are destroyed along the stretched face, which is initially compressed. Calculations performed using the nonlinear spline approximation of the concrete deformation diagram is compared with calculations performed using a bilinear diagram. Limitations on the application of nonlinear diagrams, resulting from the mathematical correctness of the mathematical model, are determined. New concepts were introduced: «analytical superelement», «method of analytic substructures».

К e y w o r d s: reinforced concrete, eccentric compression, superelement, spline approximation and bilinear approximation, analytical superelement, method of analytic substructures.

REFERENCES

1. Г о р о д е т с к и й А.С. Возможности применения superelementов при решении различных задач строительной механики [Possibilities of using superelements in solving various problems of structural mechanics]. Строительная механика и расчет сооружений [Construction mechanics and design of structures]. 2015. No. 4. Pp. 51–56. (in Russian)
2. П р з х е м и н т с к и й Е.С. Матричный метод исследования конструкций на основе анализа подструктур [Matrix method for studying structures on the basis of analysis of substructures]. Ракетная техника и космонавтика [Missile technology and astronautics]. 1963. No. 1. Pp. 165–174. (in Russian)
3. М e i s n e r K. Алгоритм многосвязного об'единения для метода жесткостей структурного анализа [Algorithm of multiply connected union for the method of rigidity of structural analysis]. Ракетная техника и космонавтика [Missile technology and astronautics]. 1968. No. 11. Pp. 153–162. (in Russian)
4. Ф е д о р е н к о Р.Р. Введение в вычислительную физику [Introduction to Computational Physics]. Dolgoprudnyy: Ed. The house «Intellect», 2008. 504 p. (in Russian)
5. А д и с х ч е в В.В., М и т а с о в В.М. Энергетический подход к моделированию процесса образования трещин в изгибающихся железобетонных элементах [Energy approach to modeling the process of crack formation in bent ferro-concrete elements]. Известия вузов. Строительство [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2005. No. 4. Pp. 26–31. (in Russian)
6. А д и с х ч е в В.В., М а л 'т с е в В.В. Применение нелинейных диаграмм деформирования бетона для расчета напряженно-деформированного состояния в изгибающейся балке численно-аналитическим методом [Application of nonlinear diagrams of concrete deformation to calculate the stress-strain state in a reinforced concrete beam by a numerical-analytical method]. Известия вузов. Строительство [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 1. Pp. 5–17. (in Russian)
7. А д и с х ч е в В.В., Б е р е з и н а Е.В., Е р ш о в а Н.В. Определение коэффициентов трансформации эталонных диаграмм для изгибающихся и внерадиально сжатых железобетонных элементов [Determination of coefficients of transformation of reference diagrams for bent and eccentrically compressed reinforced concrete elements]. Известия вузов. Строительство [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2011. No. 7. Pp. 73–81. (in Russian)

8. A d i s h c h e v V.V., B e r e z i n a E.V., E r s h o v a N.V. Eksperimental'naya aprobatsiya metoda transformatsii etalonnnykh diagram deformirovaniya betona pri izgibe [Experimental approbation of the method of transformation of standard diagrams of concrete deformation during bending]. Izvestiya vyzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2011. No. 8–9. Pp. 118–124. (in Russian)
 9. M u r a s h k i n G.V., M o r d o v s k i y S.S. Primenenie diagramm deformirovaniya dlya rascheta nesushchey sposobnosti vnetsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov [The use of deformation diagrams to calculate the bearing capacity of eccentrically compressed reinforced concrete elements]. Zhilishchnoe stroitel'stvo [Housing construction]. 2013. No. 3. Pp. 38–40. (in Russian)
 10. S t a r i s h k o I.N. Sposoby opredeleniya nesushchey sposobnosti vnetsentrenno szhatykh zhelezo-betonnykh elementov [Methods for determining the bearing capacity of eccentrically compressed reinforced concrete elements]. Vestnik MGSU [Papers of the MSUCE]. 2014. No. 4. Pp. 59–69. (in Russian)
 11. S t a r i s h k o I.N. Metodika rascheta nesushchey sposobnosti vnetsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov: analiz i predlozheniya po ee sovershenstvovaniyu [Method for calculating the bearing capacity of eccentrically compressed reinforced concrete elements: analysis and proposals for its improvement]. Vestnik MGSU [Papers of the MSUCE]. 2014. No. 3. Pp. 107–116. (in Russian)
 12. N i k u l i n A.I. K utochneniyu velichin predel'nykh otnositel'nykh deformatsiy betona v szhatoy zone izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov [To refine the values of the limiting relative deformations of concrete in the compressed zone of bent reinforced concrete elements]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Construction]. 2014. No. 8. Pp. 12–15. (in Russian)
-

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ



УДК 624.012.45

Н.В. СТАЦЕНКО

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДВУХПРОЛЕТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК*

Представлены результаты исследования, позволяющие выявить резервы эксплуатационной пригодности железобетонных двухпролетных балок путем регулирования их напряженно-деформированного состояния. В качестве регуляторов используем арматуру и заранее организованные трещины. Объектом исследования являются двухпролетные железобетонные балки. Выполнен сопоставительный анализ значений изгибающих моментов, полученных экспериментальным путем и на основе численно-аналитического решения. Численное моделирование деформирования вышеупомянутых балок под действием кратковременных нагрузок реализовано с использованием нелинейных диаграмм деформирования бетона и арматуры. Анализ полученных результатов показал, что с помощью организации трещин во время изготовления железобетонных неразрезных балок можно целенаправленно изменить пролетные и опорные моменты, тем самым при необходимости уменьшить прогибы.

Ключевые слова: железобетонные статически неопределеные балки, заранее организованные трещины, диаграммы деформирования, регулирование, численное моделирование.

DOI 10.32683/0536–1052–2018–717–9–20–31

Особенностью деформирования железобетонных конструкций в статически неопределенных системах является способность к саморегуляции напряженно-деформированного состояния в зависимости от фактически действующей нагрузки. Перераспределение усилий – один из факторов, определяющий напряженно-деформированное состояние железобетонных элементов. Исследования факторов, влияющих на перераспределение усилий в статически неопределенных конструкциях, приведены в работах [1–3]. Перераспределение усилий в статически неопределенных системах изменяет напряженно-деформированное состояние конструкций, однако без управления этим процессом на стадии проектирования эти изменения происходят случайным образом. Известен целый ряд методов искусственного

* Материалы исследований опубликованы при поддержке внутреннего гранта НГАСУ (Сибстрин) № 18-06.04.48 от 04.06.18

регулирования усилий и перемещений в стержневых системах, а также попытки создания равной прочности отдельных сечений [4].

На основе диаграммно-энергетического подхода проф. В.М. Митасовым теоретически решена задача перехода из состояния «сплошное сечение» – «сечение с трещиной» [5–7]. На основании гипотезы «о динамическом характере образования стохастических трещин» сделан вывод «о почти мгновенном продвижении трещины», разрушающей сплошность сечения железобетона. Экспериментальные исследования подтвердили этот факт [8–12]. Предложенное уравнение баланса плотности удельной энергии деформирования в общей системе уравнений диаграммно-энергетического метода позволяет оценить величину дополнительной работы, увеличивающей продвижение трещины вглубь сечения при действии постоянной нагрузки.

Для исключения или существенного снижения динамики образования стохастической трещины проф. В.М. Митасов предложил контролировать данный процесс путем организации нормальных трещин в ходе изготовления конструкций из железобетона. В развитии этого направления были проведены физические эксперименты с бетонными и железобетонными балками и безбалочными плитами перекрытия с заранее организованными трещинами [8–10, 13]. На основе первых результатов проведенных экспериментов [8] была выдвинута гипотеза о том, что заранее организованная трещина может быть вторым регулятором напряженно-деформированного состояния железобетона (первый регулятор арматура). В статически неопределеных системах есть возможность регулирования напряженно-деформированного состояния путем введения пластических шарниров (пластические шарниры вводятся традиционно с помощью арматуры).

Для подтверждения вышеупомянутой гипотезы была разработана экспериментальная программа и проведен физический эксперимент пяти серий двухпролетных железобетонных балок с различной расстановкой заранее организованных трещин. В ходе эксперимента выполнен сопоставительный анализ напряженно-деформированного состояния балок при идентичной методике проведения эксперимента. Результаты эксперимента приведены в работе [14].

Цель работы: выявить особенности деформирования двухпролетных железобетонных балок со стохастическими и организованными трещинами (табл. 1).

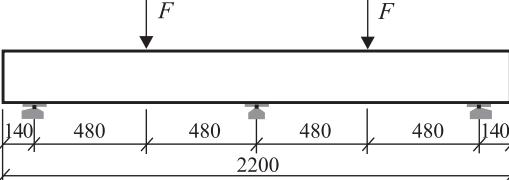
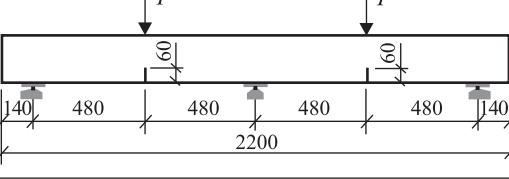
Для выполнения поставленной цели решены следующие задачи:

- сделан анализ результатов физического эксперимента [14] с целью получения исходных характеристик поведения стохастических и заранее организованных трещин;
- проанализированы аналитические значения характеристик трещинообразования с целью получения исходных данных для численного моделирования;
- разработана численная модель деформирования балок сплошного сечения и с заранее организованными трещинами;
- проведен численно-аналитический расчет двухпролетных железобетонных балок с учетом физической нелинейности материалов в среде программного комплекса «ЛИРА-САПР»;
- получены поля распределения напряжений в бетоне и эпюры усилий в арматуре;

- определены опорные и пролетные моменты, действующие на всех этапах нагружения;
- установлены особенности деформирования неразрезных железобетонных балок со стохастическими и заранее организованными трещинами;
- проведено сравнение результатов численного расчета с полученными данными при эксперименте двухпролетных железобетонных балок.

Маркировка балок: Б-1 – балка сплошного сечения, Б-3 – балка с одной организованной трещиной в середине каждого пролета. Организованная трещина образована стальной оцинкованной пластины размерами 100×60 мм и толщиной 0,3 мм.

Таблица 1. Программа эксперимента

Шифр балки	Схема расстановки организованных трещин	Продольная арматура d_s , мм $\mu, \%$	Приизменная прочность
			Размеры сечения, мм
Б-1		$\emptyset 6$ 0,15	16,22 МПа 100×200
Б-3			17,72 МПа 100×200

Численное конечно-элементное моделирование статически неопределеных железобетонных балок с учетом перераспределения усилий наиболее рационально проводить с использованием диаграмм деформирования материалов [15].

В процессе разработки численно-аналитического решения одной из поставленных задач является использование диаграммно-энергетического подхода, а именно на всех этапах нагружения конструкций необходимо проводить процедуру трансформации диаграммы. В связи с этим в ПК «ЛИРА-САПР» использовали шаговый метод, который обуславливает необходимость многократного решения систем линеаризованных уравнений.

Еще одна задача – это моделирование трещины, установленной заранее или образованной стохастически. Для моделирования необходимо знать изменение жесткости по длине элемента. С этой целью при численном исследовании поведения железобетонных балок задавали распределение жесткостей, полученных при физическом эксперименте [14].

Во время проведения физического эксперимента использовали цифровую оптическую систему VIC-3D для измерения деформаций и перемещений, которые дали возможность определить последовательность появления и характер развития первой трещины (рис. 1).

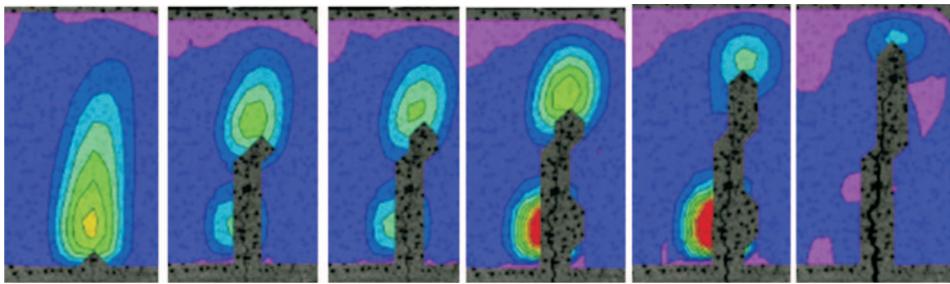


Рис. 1. Характер развития трещины

Для построения диаграмм арматуры и бетона обоснованно принято разбиение диаграмм на отдельные участки, границами которых являются характерные величины [5]. При построении сплайн-функций используется точка начала микротрецинообразования (конец условно-упругого участка диаграммы). Этот интервал необходим для определения начального модуля упругости. В связи с тем, что в программном комплексе «ЛИРА-САПР» нет диаграмм, которые бы эту точку отражали, принята кусочно-линейная диаграмма для бетона (рис. 2, а), при этом начальный модуль упругости задали вручную. Для арматуры принята линейная диаграмма (рис. 2, б). Значения напряжений и деформаций материалов в характерных узлах, показанных на диаграммах деформирования бетона и арматуры (рис. 2), приведены в табл. 2.

С целью получения перераспределения моментов за счет образования и раскрытия заранее организованных трещин, в опытных балках армирован-

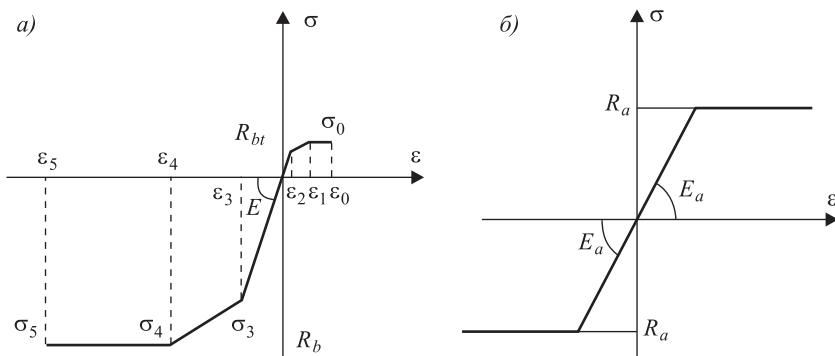


Рис. 2. Схематическое представление диаграмм деформирования в ПК «ЛИРА-САПР»: бетона (а); арматуры (б)

Таблица 2. Значения напряжений и деформаций бетона и арматуры на диаграммах деформирования рис. 2

№ узла	0	1	2	3	4-5	E_b , МПа
Бетон класса B20						
σ , МПа	0,8	1,35	0,82	-15	-9,6	24000
$\varepsilon \cdot 10^3$	0,27	0,2	0,03	-1,05	-0,4	
Арматура класса A400						
R_a , МПа		$\varepsilon \cdot 10^3$		E_a , МПа		
400		2		$2 \cdot 10^5$		

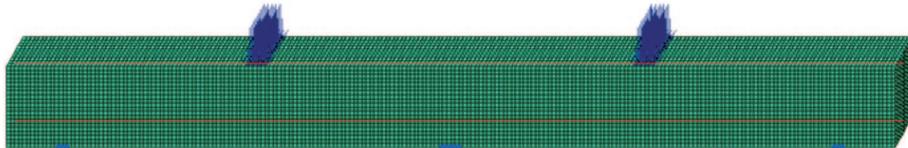


Рис. 3. Расчетная схема балки

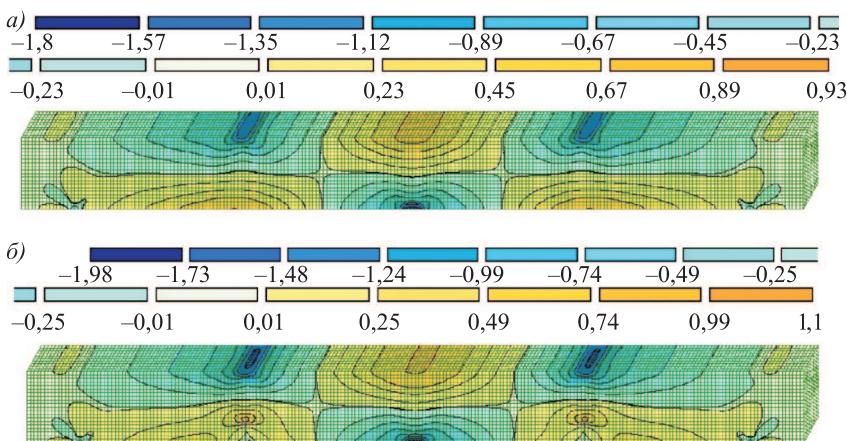
ние опорного и пролетного сечения было установлено по расчету упругой системы. Практически это достигалось тем, что в пролете и на опоре укладывали одинаковое количество арматуры. Балки армированы плоским стальным каркасом, который состоит из продольной рабочей арматуры диаметром 6 мм А-400 и поперечной – 6 мм, установленной с шагом 80 мм А-240. Коеффициент армирования – $\mu = 0,15\%$. Бетон принят мелкозернистый класса В20.

Расчетная схема представляет собой двухпролетную балку (рис. 3), смоделированную объемными конечными элементами типа 236 (физически нелинейный универсальный пространственный восьмиузловой изопараметрический конечный элемент) в ПК «ЛИРА-САПР». В качестве арматуры в расчетную схему включен элемент 10-го типа, универсальный пространственный стержневой конечный элемент.

Расчет конструкции был выполнен на нагрузку, соответствующую этапу 7 загружения по эксперименту [14], а именно по одной сосредоточенной силе $F = 11$ кН в середине каждого пролета. При данной схеме загружения отношение опорного момента к пролетному по расчету упругой системы $M_{\text{оп}}/M_{\text{пр}} = 1,2$.

Трещины моделируются путем разрезания объемных элементов, арматурные стержни не разрезаются. На основании выводов, опубликованных в работах [16, 17], сделана расшивка схемы в зоне образования стохастической трещины, что подразумевает разрыв сцепления бетона с арматурой.

Результаты исследования. Анализируя полученные распределения нормальных напряжений бетона, можно отметить, что при нагрузках этапов 1–3 загружения (1,57 кН – 4,7 кН) для балок Б-1 и Б-3 значения напряжений отличаются друг от друга на 10–18 % (рис. 4). Удалось численно подтвердить

Рис. 4. Распределение напряжений σ , МПа на этапе 3 загружения:
в балке Б-1 (а); в балке Б-3 (б)

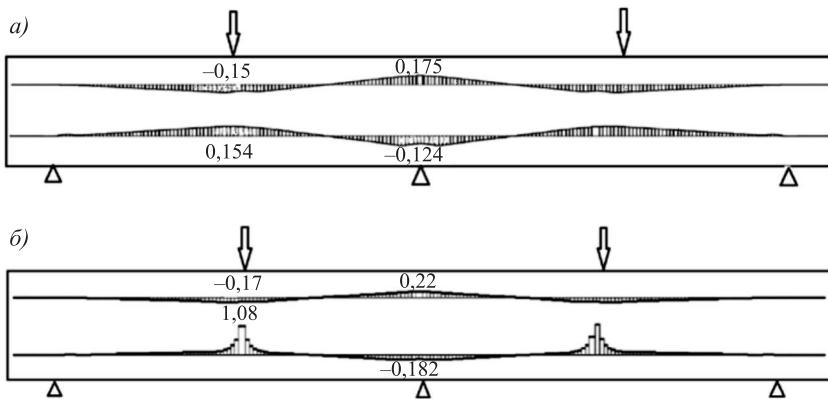


Рис. 5. Эпюра усилий N , кН в арматуре на этапе 3 загружения:
в балке Б-1 (а); в балке Б-3 (б)

в общем существующее видение работы балок Б-1 до образования стохастических трещин и Б-3 до раскрытия организованных трещин.

На рис. 5, б видно, что на стадии до начала трещинообразования влияние заранее организованных трещин в балке Б-3 существенное, в окрестности организованных трещин происходит всплеск в арматуре. Максимальное усилие в арматуре балки Б-3 (1,08 кН) в 7 раз превышает усилие в арматуре балки Б-1 (0,154 кН) в середине пролета (рис. 5, а). При этом над опорой максимальное усилие в арматуре балки Б-3 (0,22 кН) в 1,25 раза превышает усилия в арматуре балки Б-1 (0,175 кН).

С образованием стохастических и раскрытием заранее организованных трещин напряжения в бетоне и усилия в арматуре в балке Б-1 увеличиваются по сравнению с напряжениями и усилиями в балке Б-3 (рис. 6, 7). Путем установки заранее организованных трещин целенаправленно изменяется напряженно-деформированное состояние.

На рис. 7 продемонстрировано, что заранее организованные трещины изменяют качественно и количественно усилия в арматуре. Усилия в арматуре балки Б-3 (рис. 7, б) на 15 % меньше усилия в арматуре балки Б-1 (рис. 7, а).

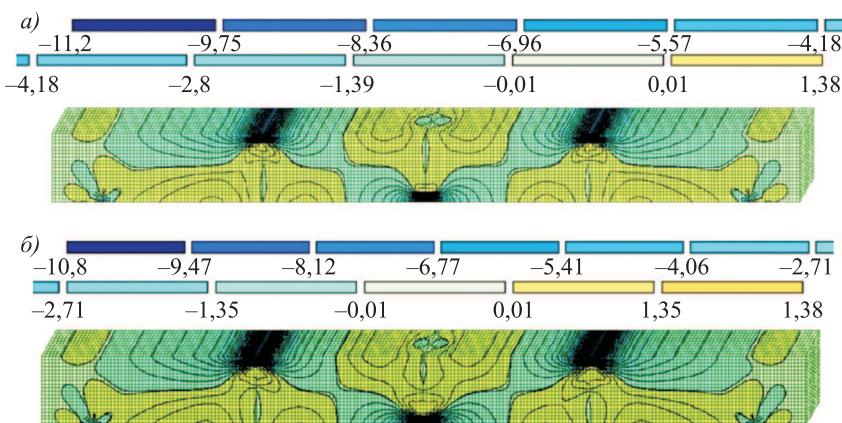


Рис. 6. Распределение напряжений σ , МПа на этапе 7 загружения:
в балке Б-1 (а); в балке Б-3 (б)

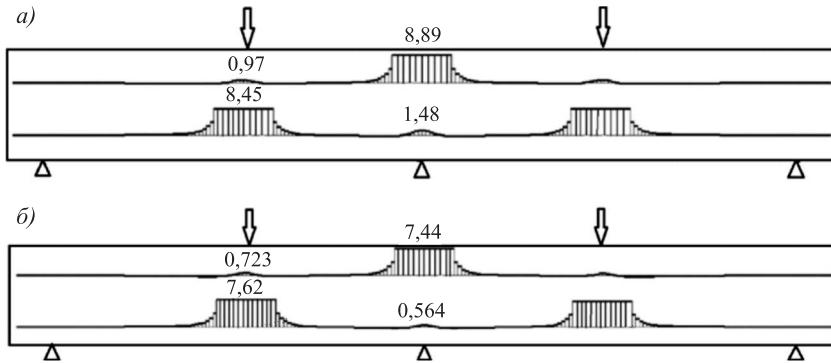


Рис. 7. Эпюра усилий N , кН в арматуре на этапе 7 загружения:
в балке Б-1 (а); в балке Б-3 (б)

Учитывая специфику железобетона, уместно воспользоваться интегральным подходом к определению моментов, не забывая, что при прочих равных условиях точность интегральных оценок, как правило, выше.

Переход от эпюры напряжений в бетоне к обобщенным внутренним усилиям определяют с помощью процедуры численного интегрирования напряжений по нормальному сечению. Для определения моментов на каждом этапе загружения воспользуемся системой уравнений:

$$\begin{cases} N_b + N'_s - N_{bt} - N_s = 0; \\ M_{ult} = N_b z_b + N'_s z'_s - N_{bt} z_{bt} - N_s z_s, \end{cases}$$

где N_b , N_{bt} , N_s , N'_s , M_{ult} – соответствующие равнодействующие внутренних (бетона и арматуры) сил и момент внутренних сил;

z_b , z_{bt} , z_s , z'_s – расстояние от равнодействующих внутренних сил до центра тяжести сечения.

Рассмотрим на этапах 3 и 7 загружения диаграммы нормальных напряжений, полученных в сечениях в середине пролета и над опорой для балки Б-1 (рис. 8) и балки Б-3 (рис. 9), и определим равнодействующие внутренних сил (табл. 3, 4) и моменты внутренних сил (табл. 5). На остальных этапах загружения расчет проводился аналогично. Результаты расчета приведены в табл. 5.

На этапе 3 загружения до достижения момента трещинообразования в балке Б-1 значения моментов (табл. 5) соответствуют упругому расчету,

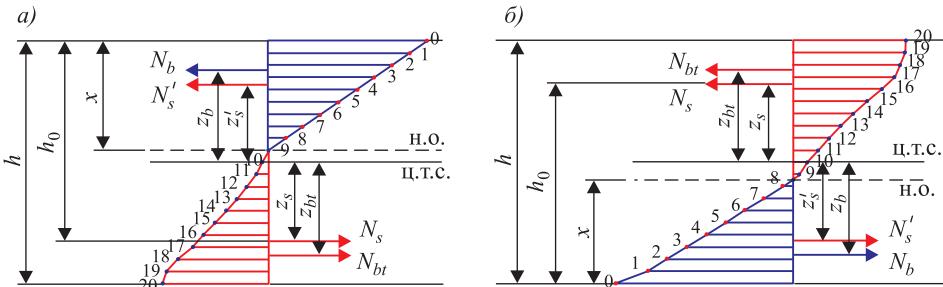


Рис. 8. Диаграммы нормальных напряжений в балке Б-1:
в середине пролета (а); на опоре (б)

Таблица 3. Равнодействующие внутренних сил и расстояния от них до центра тяжести сечения в балке Б-1

В середине пролета на этапе 3 загружения				На опоре на этапе 3 загружения			
N_b , кН	5,9	z_b , м	0,07	N_b , кН	6,42	z_b , м	0,072
N_{bt} , кН	4,55	z_{bt} , м	0,066	N_{bt} , кН	6,02	z_{bt} , м	0,062
N_s , кН	0,154	z_s , м	0,065	N_s , кН	0,175	z_s , м	0,065
N'_s , кН	0,15	z'_s , м	0,065	N'_s , кН	0,124	z'_s , м	0,065

В середине пролета на этапе 7 загружения				На опоре на этапе 7 загружения			
N_b , кН	16,3	z_b , м	0,092	N_b , кН	14,0	z_b , м	0,092
N_{bt} , кН	3,4	z_{bt} , м	0,064	N_{bt} , кН	1,38	z_{bt} , м	0,075
N_s , кН	8,45	z_s , м	0,065	N_s , кН	8,9	z_s , м	0,065
N'_s , кН	0,97	z'_s , м	0,065	N'_s , кН	1,48	z'_s , м	0,065

в балке Б-3 значения моментов больше на 13 %. В пролетных сечениях, где введены заранее организованные трещины, жесткость балки Б-3 меньше, поэтому при увеличении нагрузки момент на опоре, где жесткость больше, возрастает.

Образование и раскрытие стохастических и заранее организованных трещин изменяет распределение усилий по сравнению с распределением при

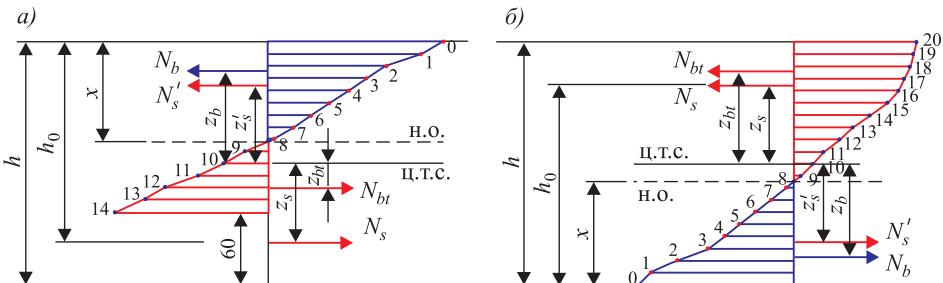


Рис. 9. Диаграммы нормальных напряжений в балке Б-3:
в середине пролета (a); на опоре (б)

Таблица 4. Равнодействующие внутренних сил и расстояния от них до центра тяжести сечения в балке Б-3

В середине пролета на этапе 3 загружения				На опоре на этапе 3 загружения			
N_b , кН	6,54	z_b , м	0,073	N_b , кН	7,01	z_b , м	0,073
N_{bt} , кН	3,58	z_{bt} , м	0,021	N_{bt} , кН	6,94	z_{bt} , м	0,06
N_s , кН	1,08	z_s , м	0,065	N_s , кН	0,222	z_s , м	0,065
N'_s , кН	0,17	z'_s , м	0,065	N'_s , кН	0,152	z'_s , м	0,065

В середине пролета на этапе 7 загружения				На опоре на этапе 7 загружения			
N_b , кН	16,7	z_b , м	0,090	N_b , кН	16,73	z_b , м	0,091
N_{bt} , кН	4,0	z_{bt} , м	0,055	N_{bt} , кН	3,4	z_{bt} , м	0,070
N_s , кН	7,62	z_s , м	0,065	N_s , кН	7,44	z_s , м	0,065
N'_s , кН	0,72	z'_s , м	0,065	N'_s , кН	0,564	z'_s , м	0,065

Таблица 5. Сравнение экспериментальных данных и теоретических расчетов

Этапы	F , кН	Серия	Численный эксперимент			Физический эксперимент			При расчете упругой системы		
			$M_{оп}$, кНм	$M_{пр}$, кНм	$\frac{M_{оп}}{M_{пр}}$	$M_{оп}$, кНм	$M_{пр}$, кНм	$\frac{M_{оп}}{M_{пр}}$	$M_{оп}$, кНм	$M_{пр}$, кНм	$\frac{M_{оп}}{M_{пр}}$
1	1,57	Б-1	0,28	0,24	1,2	0,28	0,24	1,2	0,28	0,24	1,2
		Б-3	0,30	0,20	1,5	0,33	0,21	1,57			
2	3,14	Б-1	0,56	0,47	1,2	0,56	0,47	1,2	0,56	0,47	1,2
		Б-3	0,6	0,4	1,5	0,66	0,42	1,57			
3	4,70	Б-1	0,85	0,73	1,2	0,83	0,72	1,2	0,85	0,71	1,2
		Б-3	0,96	0,56	1,4	0,97	0,64	1,5			
4	6,27	Б-1	1,1	0,95	1,15	1,04	0,98	1,06	1,13	0,94	1,2
		Б-3	1,2	0,85	1,4	1,22	0,89	1,37			
5	7,84	Б-1	1,35	1,24	1,09	1,29	1,24	1,04	1,41	1,18	1,2
		Б-3	1,4	1,22	1,14	1,36	1,20	1,13			
6	9,41	Б-1	1,57	1,53	1,02	1,54	1,49	1,03	1,69	1,41	1,2
		Б-3	1,6	1,5	1,06	1,64	1,44	1,13			
7	11,0	Б-1	1,83	1,80	1,01	1,81	1,73	1,03	1,98	1,65	1,2
		Б-3	1,85	1,77	1,03	1,81	1,73	1,03			

расчете упругой системы (табл. 5), что соответствует образованию пластических шарниров.

На этапе 7 загружения величина опорного момента при нагрузке $F = 11$ кН в каждом пролете составляла величину в балке Б-1 $M = 1,83$ кНм, в балке Б-3 $M = 1,85$ кНм (табл. 5), что меньше предельного, равного $M = 1,98$ кНм.

Выводы. 1. В балках Б-1 и Б-3 в результате образования и раскрытия стохастических и организованных трещин перераспределение усилий по сравнению с упругим расчетом на 10 % увеличило нагрузку, при которой опорное сечение достигает предельного состояния.

2. Результаты численного моделирования двухпролетных железобетонных балок на каждом этапе напряженно-деформированного состояния показали удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными, полученными при испытании образцов на действие кратковременной нагрузки.

3. В ранее проведенных экспериментах [8–10] не оценивалось напряженно-деформированное состояние арматуры, в данном численном исследовании было установлено, что в зависимости от расположения и количества организованных трещин в железобетонных балках уменьшаются усилия, напряжения и деформации в арматуре по сравнению с балками сплошного сечения при эксплуатационной нагрузке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крылов С.М. Перераспределение усилий в статически неопределеных железобетонных конструкциях. М.: Стройиздат, 1964. 165 с.
2. Тихий М., Ракосник Й. Расчет железобетонных рамных конструкций в пластической стадии. Перераспределение усилий. М.: Стройиздат, 1976. 198 с.
3. Kumagawamy S. A Experimental study on strength and flexural behaviour of reinforced concrete beams using «Deflected structural steel» as reinforcement // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. 2013. Vol. 6. No. 1. P. 38–43.
4. Абовский Н.П. Управляемые конструкции. Красноярск: КрасГАСА, 1998. 433 с.
5. Митасов В.М. Основные положения теории сопротивления железобетона: монография. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2010. 158 с.
6. Митасов В.М., Адищев В.В., Логунова М.А. Методология «сквозного» расчета изгибаемых железобетонных элементов // Тр. междунар. науч.-практ. конф. «Современная строительная наука, состояние и перспективы развития». Новосибирск, 2016. С. 50–53.
7. Митасов В.М., Логунова М.А. Совершенствование методов расчета железобетонных конструкций // Тр. междунар. науч.-практ. конф. «Наука, техническое регулирование и инжиниринг в строительстве: состояние, перспективы». Новосибирск, 2016. С. 271–273.
8. Михайлова Н.С. Экспериментальные исследования железобетонных балок без трещин и с заранее намеченной трещиной // Изв. вузов. Строительство. 2007. № 4. С. 117–120.
9. Логунова М.А., Пешков А.С. Экспериментальные исследования бетонных балок без организованных трещин и с заранее организованными трещинами // Изв. вузов. Строительство. 2011. № 1. С. 116–120.
10. Митасов В.М., Логунова М.А., Шатохина М.В. Железобетонные балки с организованными трещинами под воздействием длительной нагрузки // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 10. С. 5–10.
11. Marder M. Shock-ware theory for rupture of Rubber // Physical Review Letters. 2005. Vol. 94. Ser. 048001.
12. Guodzen T.M., Jagla E.A. Supersonic Crack Propagation in a class of Lattice Models of Mode III Brittle Fracture // Physical Review Letters. 2005. Vol. 95. Ser. 224302.
13. Митасов В.М., Логунова М.А., Стациенко Н.В. Новые подходы к решению задач деформирования железобетонных конструкций с трещинами // Изв. вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2017. Т. 7. № 1. С. 77–83.
14. Mitasov V.M., Statsenko N.V. Control of stress-strain state in double-span reinforced concrete beams // MATEC Web of Conference 143, 01007. 2018.
15. Митасов В.М., Федоров Д.А. Аналитическое представление диаграмм арматуры и бетона при одноосном растяжении – сжатии // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1987. № 9. С. 16–20.
16. Адищев В.В., Рот В.В. Определение параметров напряженно-деформированного состояния в окрестности трещины нормального отрыва в изгибаемых железобетонных элементах // Тр. НГАСУ. 2013. Т.16. № 2(56). С. 83–95.
17. Адищев В.В., Демешкин А.Г., Шульга В.К., Грачева М.С., Данилов М.Н., Мальцев В.В. Определение зоны анкеровки армирующего элемента при вытягивании из матрицы // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 12. С. 67–79.

Стаценко Наталья Валерьевна, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 13.08.18

Statsenko Natal'ya Valer'evna, Post-graduate Student

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

NUMERICAL RESEARCH OF STRESS-STRAIN STATE IN DOUBLE-SPAN REINFORCED CONCRETE BEAMS

The article presents the results of the research to identify the reserves of the operational suitability of reinforced concrete double-span beams, by regulating their stress-strain state. As regulators, we use reinforcement and pre-organized cracks. The object of research is two-span reinforced concrete beams. A comparative analysis of the values of bending moments obtained experimentally and on the basis of numerical and analytical solutions is performed. Numerical simulation of deformation of the above-mentioned beams under short-term loads is implemented using nonlinear diagrams of concrete and reinforcement deformation. Analysis of the results showed that with the help of the organization of cracks, during the manufacture of reinforced concrete continuous beams, it is possible to purposefully change the span and supporting moments, thus, if necessary, to reduce deflections.

K e y w o r d s: reinforced concrete statically indeterminate beams, pre-organized cracks, deformation diagrams, regulation, numerical simulation.

REFERENCES

1. Krylov S.M. Pereraspredelenie usiliy v staticheski neopredelmykh zhelezobetonnykh konstruktsiyakh [Redistribution of effort in statically indeterminate reinforced concrete structures]. Moscow, Stroyizdat, 1964. 165 p. (in Russian)
2. Tixiy M., Rakosnik J. Raschet zhelezobetonnykh ramnykh konstruktsiy v plasticheskoy stadii. Pereraspredelenie usiliy [Calculation of reinforced concrete frame structures in the plastic stage. Reallocation of efforts]. Moscow, Stroyizdat, 1976. 198 p. (in Russian)
3. Kumaraswamy S. A Experimental study on strength and flexural behaviour of reinforced concrete beams using «Deflected structural steel» as reinforcement. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. 2013. Vol. 6. No. 1. Pp. 38–43.
4. Abovskiy N.P. Upravlyayemye konstruktsii [Driven designs]. Krasnoyarsk: KrasGASA, 1998. 433 p. (in Russian)
5. Mitasov V.M. Osnovnye polozheniya teorii soprotivleniya zhelezobetona: monografiya [Basic provisions of the theory of resistance of reinforced concrete: monograph]. Novosibirsk: NSUACE (Sibstrin), 2010. 158 p. (in Russian)
6. Mitasov V.M., Adishchev V.V., Logunova M.A. Metodologiya «skvoznogo» rascheta izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov [Methodology of «through» calculation of bent reinforced concrete elements]. Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sovremennaya stroitel'naya nauka, sostoyanie i perspektivy razvitiya». Novosibirsk, 2016. Pp. 50–53. (in Russian)
7. Mitasov V.M., Logunova M.A. Sovremenstvovanie metodov rascheta zhelezobetonnykh konstruktsiy [Improvement of methods of calculation of reinforced concrete structures]. Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauka, tekhnicheskoe regulirovanie i inzhiniring v stroitel'stve: sostoyanie, perspektivy». Novosibirsk, 2016. Pp. 271–273. (in Russian)

8. Mikhaylova N.S. Eksperimental'nye issledovaniya zhelezobetonnykh balok bez treshchin i s zaranee namechennoy treshchinoy [Experimental investigation of reinforced concrete beams without cracks and with previously intended crack]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. 2007. No. 4. Pp. 117–120. (in Russian)
9. Logunova M.A., Peschkov A.S. Eksperimental'nye issledovaniya betonnykh balok bez organizovannykh treshchin i s zaranee organizovannymi treshchinami [Experimental research of concrete beams without cracks and with specified cracks]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. 2011. No. 1. Pp. 116–120. (in Russian)
10. Mitasov V.M., Logunova M.A., Shatokhina M.V. Zhelezobetonnye balki s organizovannymi treshchinami pod vozdeystviem dlitel'noy nagruzki [Reinforced concrete beams with specified cracks under the long-term load]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. 2013. No. 10. Pp. 5–10. (in Russian)
11. Marder M. Shock-ware theory for rupture of Rubber. Physical Review Letters. 2005. Vol. 94. Ser. 048001.
12. Guodzen T.M., Jagla E.A. Supersonic Crack Propagation in a class of Lattice Models of Mode III Brittle Fracture. Physical Review Letters. 2005. Vol. 95. Ser. 224302.
13. Mitasov V.M., Logunova M.A., Statsenko N.V. Novye podkhody k resheniyu zadach deformirovaniya zhelezobetonnykh konstruktsiy s treshchinami [New approaches to solving problems of deformation of reinforced concrete constructions with cracks]. Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'. 2017. Vol. 7. No. 1. Pp. 77–83. (in Russian)
14. Mitasov V.M., Statsenko N.V. Control of stress-strain state in double-span reinforced concrete beams. MATEC Web of Conference 143, 01007. 2018.
15. Mitasov V.M., Fedorov D.A. Analiticheskoe predstavlenie diagramm armatury i betona pri odnoosnom rastyazhenii – szhatii [Analytical graphs of rebar and concrete under uniaxial tension – compression]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura. 1987. No. 9. Pp. 16–20. (in Russian)
16. Adishchev V.V., Root V.V. Opredelenie parametrov napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya v okrestnosti treshchiny normal'nogo otryva v izgibaemykh zhelezobetonnykh elementakh [Determination of stress-strain state parameters in the vicinity of the normal separation crack in the bent reinforced concrete elements]. Trudy NGASU [Works of NSUACE]. 2013. Vol. 16. No. 2(56). Pp. 83–95. (in Russian)
17. Adishchev V.V., Demeshkin A.G., Shul'ga V.K., Gracheva M.S., Danilov M.N., Mal'tsev V.V. Opredelenie zony ankerovki armiruyushchego elementa pri vytyagivaniyu iz matritsy [Definition of the zone of anchoring of the reinforcing element when pulling from matrix]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. 2014. No. 12. Pp. 67–79. (in Russian)

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ



УДК 691.31 : 678.06

Т.А. НИЗИНА, А.Н. ЧЕРНОВ, Д.Р. НИЗИН, А.И. ГОРЕНКОВА

АНАЛИЗ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ НАПОЛНЕННЫХ МИКРОКАЛЬЦИТОМ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ С БЕТОННЫМИ ОСНОВАНИЯМИ*

Представлены результаты исследований влияния полимерных покрытий, наполненных микрокальцитом различного фракционного состава, на повышение прочностных и деформативных характеристик бетонных образцов-балочек. Исследована эффективность нанесения эпоксидных композитов, содержащих от 40 до 80 % наполнителя, на изменение прогиба и предела прочности при изгибе бетонных образцов с полимерными покрытиями, наносимыми на растянутую грань. Графический анализ влияния степени наполнения и фракционного состава микрокальцита на изменение исследуемых характеристик производился с использованием изолиний и треугольных диаграмм Розебома – Гиббса. Выявлены составы полимерных композитов, позволяющие достигать максимального прироста свойств (до 190 % по прочности при изгибе) в случае использования высоконаполненных смесей с минимальным расходом эпоксидного связующего.

Ключевые слова: полимерные покрытия, бетонные основания, наполнитель, микрокальцит, фракционный состав, степень наполнения, прочность при изгибе, прогиб.

DOI 10.32683/0536–1052–2018–717–9–32–42

В последние десятилетия все большее внимание уделяется повышению долговечности бетонных и железобетонных строительных конструкций. Цементный бетон имеет пористую структуру, что в условиях действия агрессивных факторов нередко приводит к необходимости его защиты. В зависимости от агрессивности среды может быть предусмотрена первичная защита, основанная, в первую очередь, на повышении собственной стойкости бетона, либо более сложные мероприятия вторичной защиты, подразумевающие применение защитных покрытий и облицовок [1, 2]. Среди методов вторичной защиты широкое применение нашли полимерные покрытия и пропитки [3–5]. Наибольшее распространение получили покрытия на основе эпоксидных связующих, обладающих рядом положительных качеств, таких как высокая химическая стойкость, водостойкость и способ-

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-08-01050.

ность сохранять свойства в широкой области температур [6–8]. Нанесение полимерных покрытий на растянутую грань изгибаемых элементов приводит к увеличению прочности конструкций, повышению устойчивости бетона к растрескиванию, агрессивным средам и увеличению его морозостойкости [9–12]. Кроме того, декоративные возможности бетона ограничены, в то время как эпоксидные смолы совместимы с красителями, дисперсиями красящих пигментов и цветными компонентами с почти неограниченными декоративными вариациями [13, 14]. При использовании эпоксидных связующих для ремонта и усиления конструкций, а также при устройстве полимерных полов предъявляются повышенные требования к физико-механическим характеристикам получаемых покрытий, которые должны обладать достаточной прочностью, трещиностойкостью и адгезией к основанию [9–11].

Для улучшения эксплуатационных свойств полимерных композитов в их состав вводятся различные дисперсные наполнители, существенно повышающие предел прочности при сжатии, снижающие экзотермичность процесса отверждения и расход дорогостоящего связующего, значительно уменьшая себестоимость получаемых изделий [15–20]. При этом, как отмечается в работе [20], собственная прочность дисперсного наполнителя оказывает не столь значительное влияние на изменение прочностных показателей композитов. Принцип упрочнения, в первую очередь, заключается в изменении свойств полимерной матрицы на границе наполнителя и связующего за счет его фазового перехода из объемного в более прочное пленочное состояние [21–24]. Усиление полимеров также обеспечивается адгезией связующего к поверхности жесткого и прочного наполнителя, большей, чем когезионная прочность матрицы [25, 26]. Однако отмечается, что чрезмерное повышение прочности адгезионных связей может способствовать возрастанию внутренних напряжений и снижению прочности композита [20, 22, 25].

Введение наполнителя, как правило, оказывает комплексное воздействие. Так, позитивное изменение некоторых характеристик может одновременно сопровождаться ухудшением других свойств композитов. Поиск оптимальных сочетаний различных прочностных, эксплуатационных и экономических показателей наполненных полимерных композитов осуществляется путем варьирования размеров, формы, фракционного состава и степени наполнения. При выборе составов защитных полимерных покрытий учитываются условия эксплуатации, функциональное назначение защищаемых конструкций, характер и величина эксплуатационных нагрузок.

В качестве наполнителей в строительстве широко используются марбллит, микрокальцит, тальк, асбест, базальт, слюда, мел, углеродные волокна, древесная мука и различные отходы производств [27–29]. На сегодняшний день одним из наиболее востребованных наполнителей является микрокальцит, активно применяемый в производстве пластмасс, сухих строительных смесей, бумаги и резинотехнической продукции [28, 29]. Микрокальцит (микромрамор) – минеральный наполнитель, получаемый путем механического измельчения отходов обработки природного белого мрамора с после-

дующей сепарацией [28]. Благодаря высокой химической и климатической стойкости, прочности частиц и постоянству их гранулометрического состава, а также высокой степени белизны микромрамор может быть использован в качестве наполнителя для полимерных защитно-декоративных покрытий [29–31].

В рамках проведенных исследований производилась оценка изменения несущей способности бетонных балочек с полимерными покрытиями, наполненными различными фракциями микрокальцита. В качестве связующего использовался низковязкий эпоксидный компаунд Этал-27НТ/12НТ. Фракционный состав микрокальцита был представлен следующими фракциями: МКМ1 (V_1) – крупная фракция (0,5÷1 мм); МКМ2 (V_2) – средняя фракция (0,2÷0,5 мм); МКМ3 (V_3) – мелкая фракция (менее 0,2 мм). Степень наполнения варьировалась в диапазоне от 40 до 80 % от предельного содержания микромрамора в смеси, которое определялось на основе предварительных исследований (см. таблицу). Для всех составов соблюдалось

Уровни варьирования переменных факторов

На 100 мас. ч. эпоксидного связующего

Массовое содержание наполнителей, % от максимального наполнения			Максимальное содержание наполнителей в смеси, мас. ч.		
-1	0	+1	МКМ1 (V_1)	МКМ2 (V_2)	МКМ3 (V_3)
40 %	60 %	80 %	300	250	200

условие $V_1 + V_2 + V_3 = 1$. В ходе эксперимента определялось изменение прогиба и предела прочности при изгибе бетонных образцов размером 40×40×160 мм, усиленных полимерным покрытием, нанесенным в растянутой зоне. Бетонные образцы изготавливались из мелкозернистых цементных смесей с П/Ц = 3, В/Ц = 0,6, содержащих 0,5 % Melflux 100F от массы цемента. В качестве контрольного состава защитного покрытия был выбран ненаполненный композит; расход связующего составил 25 г/образец. Толщина всех наносимых покрытий (наполненных и ненаполненного) составляла 3,5 мм. С учетом введения наполнителя расход связующего варьировался от 33 до 40,5 г/образец. Для оценки эффективности применения защитных покрытий различных составов проводилось сравнение характеристик исследуемых бетонных образцов с аналогичными показателями бетонных образцов-балочек без покрытия.

По результатам проведенных исследований установлено (рис. 1), что в зависимости от степени наполнения и фракционного состава микромрамора наблюдается изменение предела прочности при изгибе бетонных образцов с полимерными покрытиями в диапазоне от 8,6 до 13,7 МПа. Учитывая, что прочность бетонных образцов-балочек при воздействии изгибающих нагрузок составляет 6,1 МПа, нанесение ненаполненных составов защитных покрытий приводит к повышению предела прочности в 2,2 раза, наполненных – от 1,4 до 1,9 раз.

Прогиб бетонных элементов с полимерными покрытиями в 9 раз превосходит аналогичный показатель бетонных образцов в случае использования

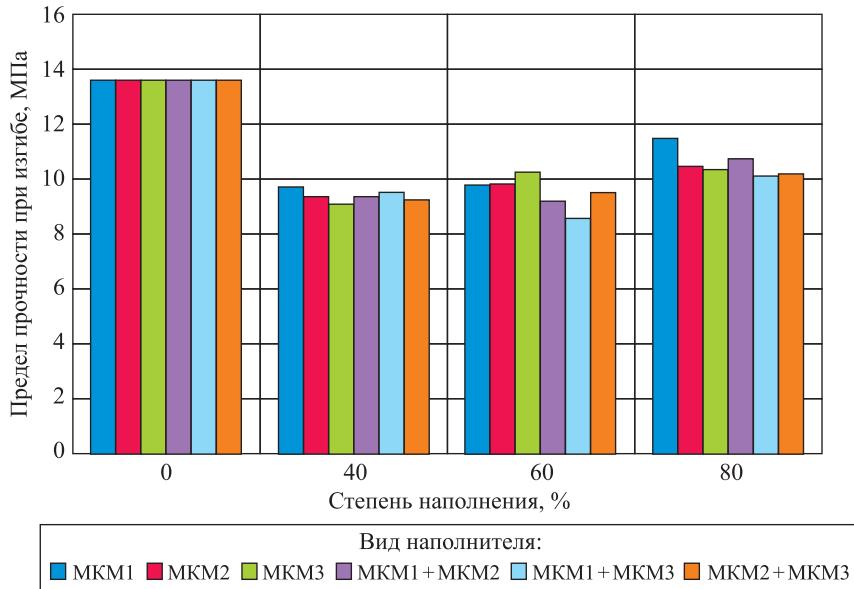


Рис. 1. Изменение предела прочности при изгибе бетонных образцов с полимерными покрытиями в зависимости от степени наполнения и фракционного состава микромрамора

ненаполненного эпоксидного композита (рис. 2). При этом введение от 40 до 80 % от предельной концентрации (по массе) микромрамора различного фракционного состава приводит к существенному снижению относительного прогиба, варьирующегося для всех исследуемых композитов от 1,2 до 2,5 раз, что, в первую очередь, связано с уменьшением деформативных характеристик самих покрытий.

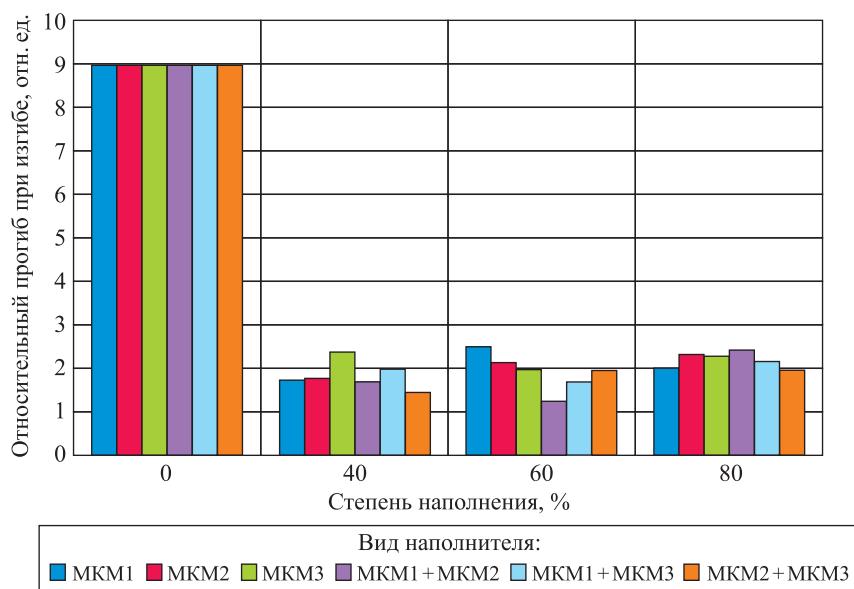


Рис. 2. Изменение относительного прогиба при изгибе бетонных образцов с полимерными покрытиями в зависимости от степени наполнения и фракционного состава микромрамора (по сравнению с бетонными образцами без покрытия)

Для оценки влияния степени наполнения и фракционного состава микромрамора на повышение прочности при изгибе бетонных образцов с полимерными покрытиями использовались изолинии изменения относительного предела прочности при изгибе по отношению к бетонным балочкам без покрытия (рис. 3). Оценка одновременного влияния трех фракций микрокальцита проводилась с помощью треугольных диаграмм Розебома–Гиббса (рис. 4), широко применяемых при анализе трехкомпонентных систем [32]. Для построения изолиний использовалась полиномиальная зависимость вида:

$$Y = 1,59 \cdot V_1 + 1,60 \cdot V_2 + 1,66 \cdot V_3 - 0,39 \cdot V_1 V_2 - 0,93 \cdot V_1 V_3 - \\ - 0,36 \cdot V_2 V_3 + 0,14 \cdot V_1 X + 0,09 \cdot V_2 X + 0,10 \cdot V_3 X - 0,03 \cdot V_1 V_2 X - \\ - 0,30 \cdot V_1 V_3 X - 0,09 \cdot V_2 V_3 X + 0,14 \cdot V_1 X^2 + 0,02 \cdot V_2 X^2 - 0,08 \cdot V_3 X^2 + \\ + 0,27 \cdot V_1 V_2 X^2 + 0,70 \cdot V_1 V_3 X^2 + 0,29 \cdot V_2 V_3 X^2.$$

Из анализа полученных результатов (рис. 3, 4) установлено, что с увеличением содержания наполнителя в составе защитных покрытий от 40 до 80 % в целом наблюдается повышение прочностных характеристик вне зависимо-

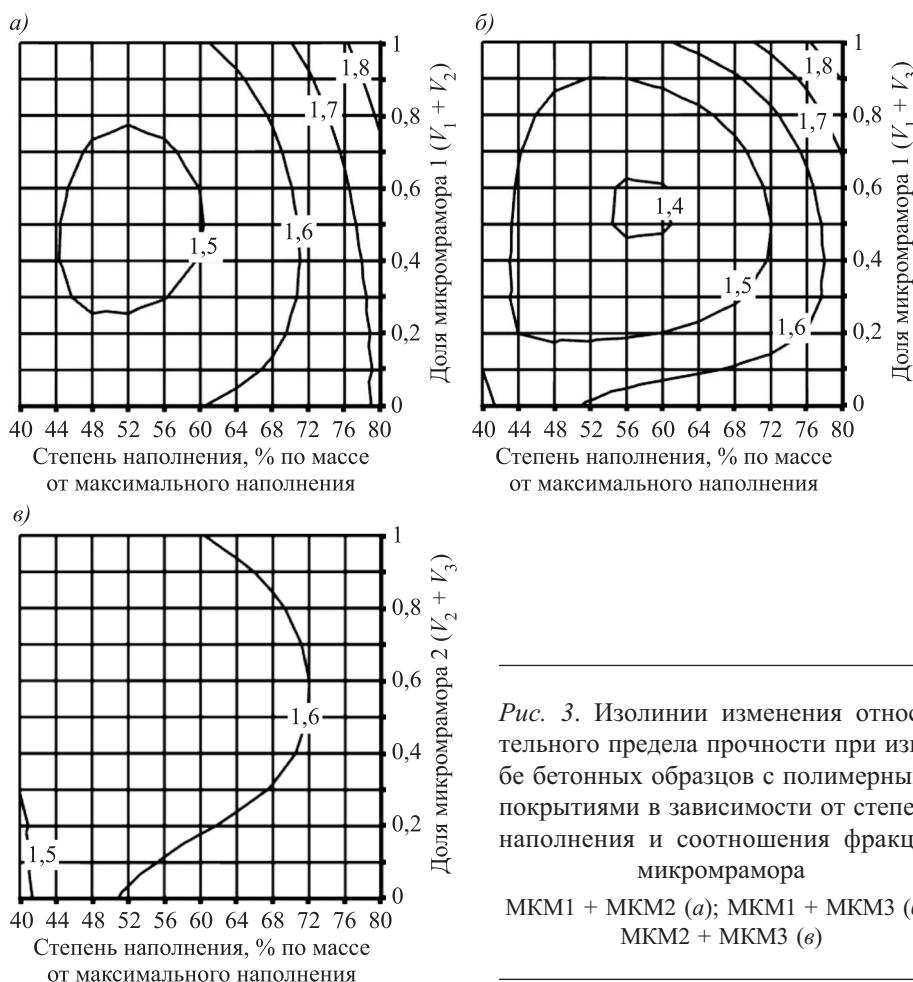


Рис. 3. Изолинии изменения относительного предела прочности при изгибе бетонных образцов с полимерными покрытиями в зависимости от степени наполнения и соотношения фракций микромрамора

MKM1 + MKM2 (a); MKM1 + MKM3 (b);
MKM2 + MKM3 (c)

сти от фракционного состава микромрамора. Наибольший прирост прочности при изгибе бетонных образцов, достигающий 190 %, установлен при насыщении полимерного покрытия, наполненного микромрамором крупной фракции при степени наполнения 80 % (рис. 3, а, б; 4, в). Повышение доли мелкой либо средней фракции в составе бинарного наполнителя приводит к снижению прочности вследствие, предположительно, роста дефицита связующего, сопровождающегося появлением пор и агрегатов, состоящих из не смоченных полимером частиц наполнителя. Однако эффект разупрочнения может быть связан не только с концентрацией напряжений в местах пор и дефектов, но и с ограничением подвижности цепей молекул полимера в пограничных с наполнителем слоях матрицы [20, 24].

Согласно [24], в структуре высоконаполненных полимерных композитов между частицами наполнителя возникают предварительно напряженные мостики индивидуальных цепочек макромолекул с ограниченной сегментальной подвижностью, которые являются причиной преждевременных разрывов и снижения деформативности. В совокупности эти явления приводят к разупрочнению композита. Минимальный прирост прочности относительно бетонных оснований, не превышающий 140 %, наблюдается при использовании полимерных покрытий, содержащих микромрамор крупной и мелкой фракций при степени наполнения, близкой к 55 % (см. рис. 3, б). Аналогичные результаты получены при использовании комбинации крупной и средней фракций микромрамора (рис. 3, а).

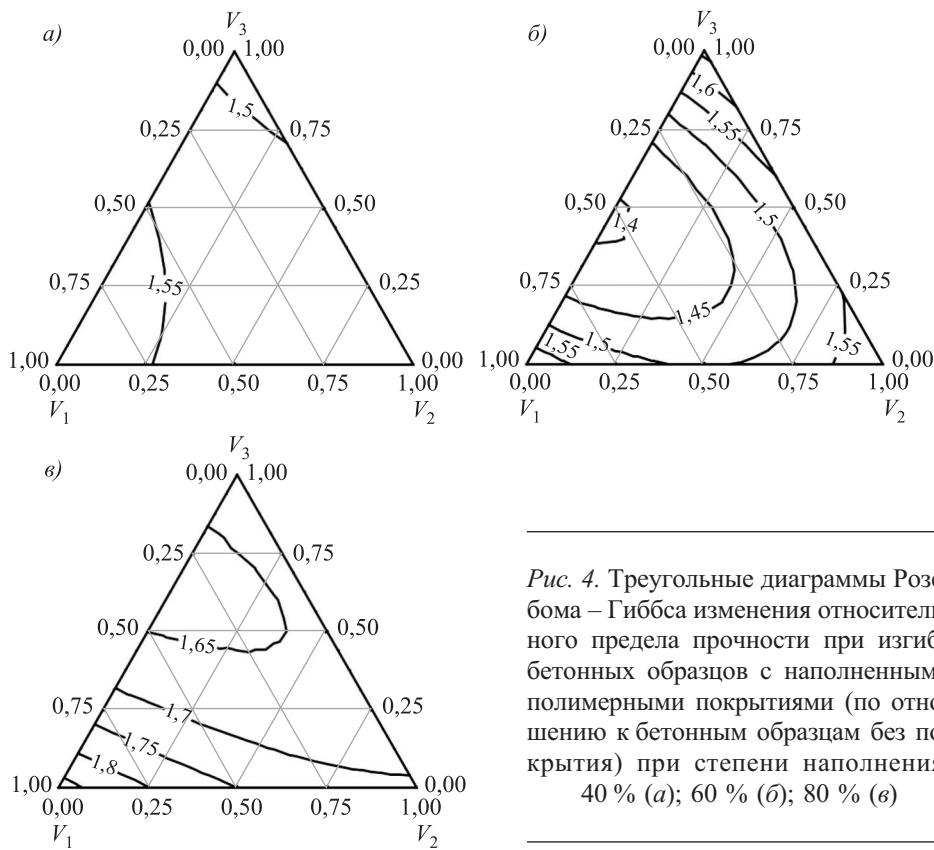


Рис. 4. Треугольные диаграммы Розебома – Гиббса изменения относительного предела прочности при изгибе бетонных образцов с наполненными полимерными покрытиями (по отношению к бетонным образцам без покрытия) при степени наполнения: 40 % (а); 60 % (б); 80 % (в)

В результате проведенных исследований установлено, что применение наполненных микромрамором (от 40 до 80 % от предельного содержания по массе) полимерных покрытий позволяет повысить предел прочности при изгибе бетонных оснований в 1,4–1,9 раза. При этом даже для высоко-наполненных составов (80 %) возможно добиться наибольшего эффекта, проявляющегося при использовании микромрамора крупной фракции (МКМ1) с размером частиц, варьирующимся от 0,5 до 1 мм. Нанесение ненаполненных полимерных покрытий способствует значительному повышению прогибов при изгибе бетонных образцов-балочек, достигающих 900 %. Прирост прогибов при использовании высоконаполненного состава (80 % МКМ1), позволяющего достигать наибольшего прочностного эффекта, составляет 194 % по сравнению с бетонными образцами без покрытия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Б а б у ш к и н В.И. Защита строительных конструкций от коррозии, старения и износа. Харьков: Выща школа., 1989. 168 с.
2. Н и з и н а Т.А. Защитно-декоративные покрытия на основе эпоксидных и акриловых связующих. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2007. 258 с.
3. Bassi R., Roy S.K. Handbook of Coatings for Concrete. Latheronwheel: Whittles Publishing, 2002. 253 р.
4. З а й ц е в А.А., М а к с и м о в с к и х А.В., К а л о ш и н а С.В. Вторичная защита бетона от коррозии // Соврем. технологии в строительстве. Теория и практика. 2016. № 1. С. 266–272.
5. Б а ж е н о в С.Л., Б е р л и н А.А., К у л ь к о в А.А., О ш м я н В.Г. Полимерные композиционные материалы. Прочность и технологии. М.: Интеллект, 2009. 352 с.
6. С о л о м а т о в В.И., С е л я е в В.П., С о к о л о в а Ю.А. Химическое сопротивление материалов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: РААСН, 2001. 284 с.
7. Schweitzer P.A. Corrosion-Resistant Linings and Coatings. New York: Marcel Dekker Inc., 2001. 309 р.
8. Dębska B., & Lichota L. Resin Composites with High Chemical Resistance for Application in Civil Engineering // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2016. No. 60(2). P. 281–287.
9. С е л я е в В.П., Б а ж е н о в Ю.М., С о к о л о в а Ю.А., Цыганов В.В., Н и з и н а Т.А. Полимерные покрытия для бетонных и железобетонных конструкций. Саранск: Изд-во СВМО, 2010. 224 с.
10. С е л я е в В.П., Цыганов В.В. Работоспособность изгибаемых элементов с полимерными покрытиями в условиях совместного действия нагрузок и агрессивных сред // Вестн. Волгоград. гос. архит.-строит. ун-та. Серия: Строительство и архитектура. 2014. Вып. 37(56). С. 87–92.
11. К у р л а п о в Д.В., К у в а е в А.С., Р одионов А.В., В а л е е в Р.М. Усиление железобетонных конструкций с применением полимерных композитов // Инженерно-строительный журн. 2009. № 3(5). С. 22–24.
12. Д о в б е н к о В.С. Экспериментальное исследование железобетонных балок, усиленных полимерной композицией // Стр-во и реконструкция. 2014. № 1(51). С. 22–28.
13. Charvat R.A. Coloring of plastics: Fundamentals. 2nd edition. Ohio: Wiley-Interscience, 2004. 430 p.

14. M üller A. *Coloring of plastics. Fundamentals – Colorants – Preparations*. Munich: Carl Hanser Verlag, 2003. 278 p.
15. Хозин В.Г. Влияние наполнителей на свойства эпоксидных материалов // Клей. Герметики. Технологии. 2006. № 11. С. 12–22.
16. Roth R. *Particulate-Filled Polymer Composites* 2nd edition. New York: Knovel, Rapra Technology Limited, 2008. 560 p.
17. Низина Т.А., Морозов М.А., Низин Д.Р., Чернов А.Н. Экзотермичность наполненных эпоксидных композитов // Региональная архитектура и строительство. 2016. № 3(28). С. 68–76.
18. Мусаева А.Ю. Влияние наполнителя на свойства композиций на основе эпоксидного олигомера // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2017. № 9-2. С. 10–13.
19. Кононенко А.С., Алешин В.Ф., Колобов А.Ю., Дмитраков К.Г. Улучшение механических и эксплуатационных свойств полимерных материалов путем использования наполнителей // Междунар. науч. журн. 2016. № 3. С. 59–66.
20. Берлин А.А. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие. 3-е испр. изд. СПб.: ЦОП «Профессия», 2011. 560 с.
21. Лахно А.В., Бобрышев А.Н., Зубарев П.А., Петренко В.О., Новиков Е.В. Некоторые аспекты усиления полимерных композитов // Междунар. техн.-экон. журн. 2012. № 5. С. 100–105.
22. Зубов П.И. Структура и свойства полимерных покрытий. М.: Химия, 1982. 256 с.
23. Бобрышев А.Н., Ерофеев В.Т., Козоматов В.Н. Физика и синергетика дисперсно-неупорядоченных конденсированных композитных систем. СПб.: Наука, 2012. 476 с.
24. Бобрышев А.Н., Козоматов В.Н., Бабин Л.О., Соломатов В.И. Синергетика композитных материалов. Липецк: РПГФ «Юлис», 2006. 170 с.
25. Липатов Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров. М.: Химия, 1991. 260 с.
26. Хозин В.Г. Усиление эпоксидных полимеров. Казань: Дом печати, 2004. 446 с.
27. Mascia L. *The Role of Additives in Plastics*. London: Edward Arnold, 1974. 172 p.
28. Wyruch G. *Handbook of fillers*. 4th Edition. Toronto: ChemTec Publishing, 2016. 922 p.
29. Xanthos M. *Functional fillers for plastics*. Second, updated and enlarged edition. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010. 507 p.
30. Кочергин Ю.С., Попова О.С., Григоренко Т.И. Свойства эпоксидных композиционных материалов, наполненных карбонатом кальция // Вестн. Белгород. гос. технол. ун-та им. В.Г. Шухова. 2017. № 2. С. 53–56.
31. Низина Т.А., Чернов А.Н., Морозов М.А., Низин Д.Р., Попова А.И. Влияние гранулометрического состава микромрамора на физико-механические характеристики наполненных эпоксидных композитов // Вестн. МГСУ. 2016. № 9. С. 98–107.
32. Низина Т.А., Балыков А.С. Экспериментально-статистические модели свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 2(62). С.13–26.

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

Чернов Алексей Николаевич, асп.; E-mail: lhms13@yandex.ru
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Низин Дмитрий Рудольфович, канд. техн. наук; E-mail: nizindi@yandex.ru
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Горенкова Анастасия Ивановна, студ.; E-mail: gorenkovaai@mail.ru
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Получено 06.08.18

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

Chernov Aleksey Nikolaevich, Post-graduate Student; E-mail: lhms13@yandex.ru
Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Nizin Dmitriy Rudol'fovich, PhD; E-mail: nizindi@yandex.ru
Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Gorenkova Anastasiya Ivanovna, Student; E-mail: gorenkovaai@mail.ru
Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

ANALYSIS OF JOINT WORK OF MICROCALCITE FILLED POLYMER COATINGS WITH CONCRETE BASES

The research results of the influence of polymer coatings filled with microcalcite of different fractional composition on the increase in the strength and deformative characteristics of concrete samples are presented. The efficiency of applying epoxy composites containing from 40 to 80 % of filler on the change of the deflection and ultimate bending strength of concrete samples with polymer coatings applied to the stretched edge, was investigated. A graphical analysis of the effect of filling degree and the fractional composition of microcalcite on the investigated characteristics change was carried out using isolines and Rosebom – Gibbs triangular diagrams. The compositions of polymer composites characterized by the maximum increase in properties (up to 190 % of flexural strength) in the case of using highly filled mixtures with a minimum consumption of epoxy binder were revealed.

К e y w o r d s: polymer coating, concrete bases, filler, microcalcite, fractional composition, filling degree, bending strength, deflection.

REFERENCES

1. B a b u s h k i n V.I. Zashchita stroitel'nykh konstruktsiy ot korrozii, stareniya i iznosa [Protection of building structures against corrosion, aging and wear]. Har'kov, Vysshaya shkola, 1989. 168 p. (in Russian)
2. N i z i n a T.A. Zashchitno-dekorativnye pokrytiya na osnove epoksidnykh i akrilovykh svyazuyushchikh [Protective and decorative coatings based on epoxy and acrylic binders]. Saransk, Publishing house Mordovia State University, 2007. 258 p. (in Russian)
3. B a s s i R., R o y S.K. Handbook of Coatings for Concrete. Latheronwheel: Whittles Publishing, 2002. 253 p.
4. Z a y t s e v A.A., M a k s i m o v s k i k h A.V., K a l o s h i n a S.V. Vtorichnaya zashchita betona ot korrozii [Secondary corrosion protection for concrete]. Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika [Modern technology in construction. Theory and practice]. 2016. No. 1. Pp. 266–272. (in Russian)
5. B a z h e n o v S.L., B e r l i n A.A., K u l ' k o v A.A., O s h m y a n V.G. Polimernye kompozitsionnye materialy. Prochnost' i tekhnologii [Polymer composite materials. Strength and technology]. Moscow, Intellekt, 2009. 352 p. (in Russian)

6. Solomatov V.I., Selyaev V.P., Sokolova Yu.A. Khimicheskoe sопротивление материалов [Chemical resistance of materials]. 2-е изд., перераб. и доп. Moscow, RAASN, 2001. 284 p. (in Russian)
7. Schweitzer P.A. Corrosion-Resistant Linings and Coatings. New York, Marcel Dekker Inc., 2001. 309 p.
8. Dębska B., & Lichota L. Resin Composites with High Chemical Resistance for Application in Civil Engineering. Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2016. No. 60(2). Pp. 281–287.
9. Selyaev V.P., Bazhenov Yu.M., Sokolova Yu.A., Tsyganov V.V., Nizina T.A. Polimernye pokrytiya dlya betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy [Polymer coatings for concrete and reinforced concrete structures]. Saransk, Publishing house SVMO, 2010. 224 p. (in Russian)
10. Selyaev V.P., Tsyganov V.V. Rabotosposobnost' izgibaemykh elementov s polimernymi pokrytiyami v usloviyakh sovmestnogo deystviya nagruzok i aggressivnykh sred [Efficiency of flexible elements with polymer coatings under conditions of combined action of loads and aggressive media]. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkitektura [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture]. 2014. No. 37(56). Pp. 87–92. (in Russian)
11. Kurlapov D.V., Kuvaev A.S., Rodionov A.V., Valeev R.M. Usilennie zhelezobetonnykh konstruktsiy s primeneniem polimernyh kompozitov [Strengthening of reinforced concrete structures using polymer composites]. Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal [Magazine of Civil Engineering]. 2009. No. 3(5). Pp. 22–24. (in Russian)
12. Dobenkova V.S. Eksperimental'noe issledovanie zhelezobetonnykh balok, usilennykh polimernoy kompozitsiey [Experimental study of reinforced concrete beams reinforced with polymer composition]. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya [Construction and reconstruction]. 2014. No. 1(51). Pp. 22–28. (in Russian)
13. Charvat R.A. (Ed.) Coloring of plastics: Fundamentals. 2nd edition. Ohio: Wiley-Interscience, 2004. 430 p.
14. Müller A. Coloring of plastics. Fundamentals – Colorants – Preparations. Munich: Carl Hanser Verlag, 2003. 278 p.
15. Khozin V.G. Vliyanie napolniteley na svoystva epoksidnykh materialov [The effect of fillers on the properties of epoxy materials]. Klei. Germetiki. Tekhnologii [Polymer Science. Series D]. 2006. No. 11. Pp. 12–22. (in Russian)
16. Rothorn R. Particulate-Filled Polymer Composites 2nd edition. New York, Knovel, Rapra Technology Limited, 2008. 560 p.
17. Nizina T.A., Morozov M.A., Nizin D.R., Chernov A.N. Ekzotermichnost' napolnennykh epoksidnykh kompozitov [Exothermicity of Filled Epoxy Composites]. Regional'naya arkitektura i stroitel'stvo [Regional architecture and engineering]. 2016. No. 3(28). Pp. 68–76. (in Russian)
18. Musaeva A.Yu. Vliyanie napolnitelya na svoystva kompozitsiy na osnove epoksidnogo oligomera [The effect of filler on the properties of compositions based on epoxy oligomer]. Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk [Actual problems of the humanities and natural sciences]. 2017. No. 9-2. Pp. 10–13. (in Russian)
19. Kononenko A.S., Alekshin V.F., Kolobov A.Yu., Dmitrakov K.G. Uluchshenie mekhanicheskikh i ekspluatatsionnykh svoystv polimernykh materialov putem ispol'zovaniya napolniteley [Improving the mechanical and performance properties of polymeric materials through the use of fillers]. Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal [The International Scientific Journal]. 2016. No. 3. Pp. 59–66. (in Russian)

20. Berlin A.A. Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya: uchebnoe posobie [Polymer composite materials: structure, properties, technology: a tutorial]. 3-e isp. izd. Saint-Petersburg, TSOP «Professiya», 2011. 560 p. (in Russian)
21. Lakhno A.V., Bobryshev A.N., Zubarev P.A., Petrenko V.O., Novikov E.V. Nekotorye aspekty usileniya polimernykh kompozitov [Some aspects of the reinforcement of polymer composites]. Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskiy zhurnal [The International Technical-Economic Journal]. 2012. No. 5. Pp. 100–105. (in Russian)
22. Zubov P.I. Struktura i svoystva polimernykh pokrytiy [Structure and properties of polymer coatings]. Moscow, Khimiya, 1982. 256 p. (in Russian)
23. Bobryshev A.N., Erofeev V.T., Kozomato V.N. Fizika i sinergetika dispersno-neuporyadochennykh kondensirovannykh kompozitnykh system [Physics and synergetics of dispersed-disordered condensed composite systems]. Saint-Petersburg, Nauka, 2012. 476 p. (in Russian)
24. Bobryshev A.N., Kozomato V.N., Babin L.O., Solomatov V.I. Sinergetika kompozitnykh materialov [Synergy of composite materials]. Lipetsk, RPGF «Yulis», 2006. 170 p. (in Russian)
25. Lipatov Yu.S. Fiziko-khimicheskie osnovy napolneniya polimerov [Physico-chemical basics of filling polymers]. Moscow, Khimiya, 1991. 260 p. (in Russian)
26. Khozin V.G. Usilenie epoksidnykh polimerov [Strengthened epoxy polymers]. Kazan', Dom pechati, 2004. 446 p. (in Russian)
27. Mascia L. The Role of Additives in Plastics. London, Edward Arnold, 1974. 72 p.
28. Wypych G. Handbook of fillers. 4th Edition. Toronto, ChemTec Publishing, 2016. 922 p.
29. Xanthos M. Functional fillers for plastics. Second, updated and enlarged edition. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010. 507 p.
30. Kochergin Yu.S., Popova O.S., Grigorenko T.I. Svoystva epoksidnykh kompozitsionnykh materialov, napolnennykh karbonatom kal'tsiya [Properties of epoxy composite materials filled with calcium carbonate]. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov]. 2017. No. 2. Pp. 53–56. (in Russian)
31. Nizina T.A., Chernov A.N., Morozov M.A., Nizin D.R., Popova A.I. Vliyanie granulometricheskogo sostava mikromramora na fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki napolnennykh epoksidnykh kompozitov [Influence of the micro-marble granulometric composition on the physicomechanical characteristics of filled epoxy composites]. Vestnik MGSU [Papers of the MSUCE]. 2016. No. 9. Pp. 98–107. (in Russian)
32. Nizina T.A., Bal'ykov A.S. Eksperimental'no-statisticheskie modeli svoystv modifitsirovannykh dispersno-armirovannykh melkozernistykh betonov [Experimental statistical models of the properties of modified dispersion-reinforced fine-grained concretes]. Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal [Magazine of Civil Engineering]. 2016. No. 2(62). Pp. 13–26. (in Russian)

УДК 691.42 : 53

В.З. АБДРАХИМОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЕРАМИЧЕСКИХ МАСС, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ТЕКСТУРЫ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА НА ОСНОВЕ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ

В настоящее время природные сырьевые ресурсы истощены, поэтому необходимо вовлекать отходы в производственный оборот для изготовления керамических материалов. При этом исключаются затраты на геолого-разведочные работы, строительство и эксплуатацию карьеров, освобождаются значительные земельные участки от воздействия негативных антропогенных факторов. Цель и задача настоящей работы – исследовать на основе отходов горючих сланцев: межсланцевой глины, горелых пород и золы-уноса а) структурно-реологические свойства керамических масс для производства керамического кирпича; б) физико-механические показатели; в) структуру пористости. Показаны существенные влияния количества золы-уноса и горелых пород на структурно-реологические свойства керамических масс для керамического кирпича. При увеличении влажности до 28 % пластическая прочность составов, содержащих максимальное количество золы-уноса и горелых пород, уменьшается в 2–2,5 раза, при этом значительно снижается предел прочности при растяжении, что приведет к нарушению процесса формования и кискажению конфигурации изделий. Последнее можно устраниить путем вылеживания керамической шихты. Исследования показали, что наличие пор изометрической формы и овальной закрытой пористости, в отличие от вытянутых (щелевидных) пор, в керамических материалах придают им механическую прочность.

Ключевые слова: отходы горючих сланцев, межсланцевая глина, горелые породы, зола-унос, реологические свойства, пористость, керамический кирпич.

DOI 10.32683/0536–1052–2018–717–9–43–55

Введение. Близкие (подобные) химические и минералогические составы природного сырья и отходов топливно-энергетического комплекса позволяют последние использовать в производстве керамических композиционных материалов строительного направления и рассматривать эти две группы сырья как единую сырьевую базу стройиндустрии [1–3].

С стоимости построенного жилого дома доля керамического кирпича составляет 15–25 %. Стоимость сырьевых компонентов при производстве керамического кирпича иногда достигает 40–45 %. В связи с этим проблема снижения цены сырьевых материалов в производстве кирпича приобретает особую актуальность. Одним из аспектов решения этой проблемы является использование промышленных отходов в производстве керамических материалов.

Цель работы. Исследовать на основе отходов горючих сланцев: межсланцевой глины, горелых пород, золы-уноса: а) структурно-реологические

свойства керамических масс для производства керамического кирпича; б) физико-механические показатели; в) структуру пористости.

Методика эксперимента. Реологические параметры определяются молекулярными силами сцепления между элементами структуры, взаимодействия элементов между собой и с молекулами дисперсионной среды, особенно от их теплового движения. Изменяя эти факторы путем подбора композиций с различным содержанием отощителя и глинистого материала, можно регулировать и реологические свойства дисперсных структур, тем самым уменьшить процессы разрушения, протекающие при формовке и сушке керамических изделий. Это и определило характер исследований, которые проводились по методикам, как и в работах [4–6].

Технологический процесс пластической обработки и формования керамической массы имеет целью образование такой коагуляционной структуры, которая может служить основой для получения высококачественных изделий. Это предопределяет детальное изучение физико-химических и структурно-реологических свойств как глинистого сырья без отощителей, так и составов с отощителями, а также действия на них (составов керамических масс без отощителей и с отощителями) различных физико-химических и механических факторов [6–9].

Массы для формования опытных образцов готовили из межсланцевой глины, горелых пород и золы-уноса по методикам, представленным в работах [8–11]. Упругопластичновязкие показатели керамических масс определяли на сдвиговом приборе, пластическую прочность – на горизонтальном коническом пластиметре, при постоянных скоростях ($0,052 \cdot 10^{-3}$ м/с) и глубине внедрения конуса [4, 5]. Способ определения пластической прочности керамической массы включает измерение глубины погружения H_i в массу конуса через фиксированные промежутки времени. Идея конических пластометров заключается в том, что по величине глубины погружения конуса в материал под воздействием вертикальной силы можно определить предельное напряжение сдвига материала [4, 5].

Оптимальная формовочная влажность керамической шихты различного состава устанавливалась графически по кривым зависимости пластической прочности P от влажности W [4–6]. Оценка способности керамических масс на прочность производилась на разрывной машине при постоянной скорости деформации $0,0415 \cdot 10^{-3}$ м/с. Тщательная обработка керамических составов производилась на эффективном смесителе «ВНИИстром-100».

Для исследования структуры исследуемых образцов был использован метод растровой микроскопии. Электронный растровый сканирующий микроскоп JEOL-6390A применяется для наблюдения и фотографирования микрорельефа поверхности в режиме вторичных электронов.

Экспериментальная часть. Сырьевые материалы. Межсланцевая глина образуется при добыче горючих сланцев на сланцеверерабатывающих заводах (на шахтах) и является отходом горючих сланцев. По числу пластичности межсланцевая глина относится к высокопластичному глинистому сырью (число пластичности 20–27) с истинной плотностью $2,55\text{--}2,62$ г/см³. Минералогический состав межсланцевых глин разнообразен, однако общим для них является наличие кремнезема, гидрослюды, монтмориллонита и

Исследование структурно-реологических свойств керамических масс...

Т а б л и ц а 1. Химический состав компонентов

Компонент	Содержание оксидов, мас. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	П.п.п.
Межсланцевая глина	45–47	13–14	5–6	11–13	2–3	3–4	9–20
Горелые породы	39–40	12–13	8–9	17–19	2–3	2,5–4	14–16
Зола-унос	30–32	13–15	7–8	14–15	1–1,5	4–5	26–28

кальцита. Глинистые минералы в межсланцевой глине в основном представлены монтмориллонитом с примесью гидрослюды, поэтому она вполне может заменить монтмориллонитовую глину при производстве пористого заполнителя, например, пористого заполнителя – керамзита.

Химический оксидный состав межсланцевой глины представлен в табл. 1, поэлементный в табл. 2, гранулометрический (фракционный) в табл. 3, а технологические свойства в табл. 4.

Горелые породы образуются в местах добычи сланцев. Горелые породы представляют собой продукт низкотемпературного обжига при самовозгорании породы (смесь глины и сланцев) в терриконах в окислительной среде. Количество горелых пород в терриконах составляет от 75 до 90 % от объема отвала. По основным физическим и химическим свойствам они близки к глинам, обожженным при 800–1000 °C.

Т а б л и ц а 2. Поэлементный анализ компонентов

Компонент	Элементы									
	C	O	Na	Mg	Al+Ti	Si	S	K	Ca	Fe
Межсланцевая глина	5,73	51,06	0,46	1,04	7,20	18,66	1,83	1,75	10,53	3,35
Горелые породы	7,32	53,94	0,37	0,61	6,65	15,15	2,87	0,76	8,46	4,17
Зола-унос	8,1	55,71	0,98	0,78	7,12	14,8	1,23	0,70	7,6	3,98

Т а б л и ц а 3. Фракционный состав компонентов

Компонент	Содержание фракций, %, размер частиц, мм				
	>0,063	0,063–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,0001
Межсланцевая глина	5	7	12	14	62
Горелые породы	19,05	33,08	32,2	11,78	3,89
Зола-унос	–	2,4	3,8	9,3	84,5

Т а б л и ц а 4. Технологические показатели компонентов

Компонент	Теплотворная способность, ккал/кг	Огнеупорность, °C		
		начало деформации	размягчение	жидкоплавкое состояние
Межсланцевая глина	1100	1260	1290	1320
Горелые породы	1900	1260	1290	1310
Зола-унос	2300	1240	1280	1290

Истинная плотность горелых пород составляет $2,4\text{--}2,7 \text{ г/см}^3$, средняя плотность – $1,3\text{--}1,8 \text{ г/см}^3$. Особенность горелых пород – высокая микропористость как следствие появления микрощелей и достаточно высокая адсорбционная активность. Химический оксидный состав горелых пород представлен в табл. 1, поэлементный в табл. 2, гранулометрический (фракционный) в табл. 3, а технологические свойства в табл. 6.

Зола-унос. При сжигании горючих сланцев образуется зола-унос, которая является тонкодисперсным материалом и состоит из минеральной части сжиженного топлива и улавливаемых частиц из дымовых газов ТЭС. Химический оксидный состав золы-уноса представлен в табл. 1, поэлементный в табл. 2, гранулометрический (фракционный) в табл. 3, а технологические свойства в табл. 4. Плотность золы-уноса составляет $2\text{--}2,5 \text{ г/см}^3$, насыпная плотность $0,85\text{--}1,05 \text{ г/см}^3$, удельная поверхность $1150\text{--}1280 \text{ см}^2/\text{г}$. Размер частиц золы-уноса в основном колеблется от 3–5 до 100–150 мк.

Технологический процесс и экспериментальные результаты. Исследования влияния количества горелых пород и золы-уноса в керамической смеси на структурно-реологические параметры проводились на составах, приведенных в табл. 5.

Таблица 5. Составы керамических масс

Компоненты	Содержание компонентов, мас. %							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Межсланцевая глина	80	70	60	50	80	70	60	50
Горелые породы	–	–	–	–	20	30	40	50
Зола-унос	20	30	40	50	–	–	–	–

Получение керамических масс осуществлялось по следующей технологии: сырьевые материалы высушивались до влажности не более 5 %, затем измельчались до прохождения сквозь сито 1 мм и тщательно перемешивались.

Результаты исследований упругопластичновязких свойств исследуемых составов исследовали аналогично работам [4, 5, 7, 8] при влажности, соответствующей формовочной, приведены в табл. 6 (при $W_{\text{отн}} = 22 \%$).

Таблица 6. Физико-механические свойства керамических масс

№ состава	$P \cdot 10^{-3}$, Па	K_B , %	$B \cdot 10^{-3}$	$\delta \cdot 10^{-3}$, Па	$E_{\text{отн}}$, %	Деформации, %		
						E_1	E_2	E_3
1	90	5,1	6,3	42,3	12,4	22,4	12,1	64,8
2	83	4,4	6,5	35,0	9,4	27,0	16,3	58,2
3	58	3,2	7,0	26,6	8,5	33,1	18,6	49,0
4	44	2,7	8,48	19,84	6,3	39,2	22,0	44,2
5	92	5,8	6,2	43,4	11,4	23,3	12,5	67,0
6	85	4,4	6,2	35,5	9,1	29,2	18,3	59,4
7	61	4,0	6,8	26,8	8,4	34,4	18,2	50,2
8	52	3,6	8,5	19,8	5,7	38,3	232	45,1

Т а б л и ц а 7. Составы и физико-механические показатели кирпича

Компоненты	Содержание компонентов, мас. %		
	1 _{МГ}	3 _{МГ}	7 _{МГ}
Межсланцевая глина	100	60	60
Горелые породы	—	40	—
Зола-унос	—	—	40

П р и м е ч а н и е. Состав 1_{МГ} (межсланцевая глина = 100 %) взят для сравнения.

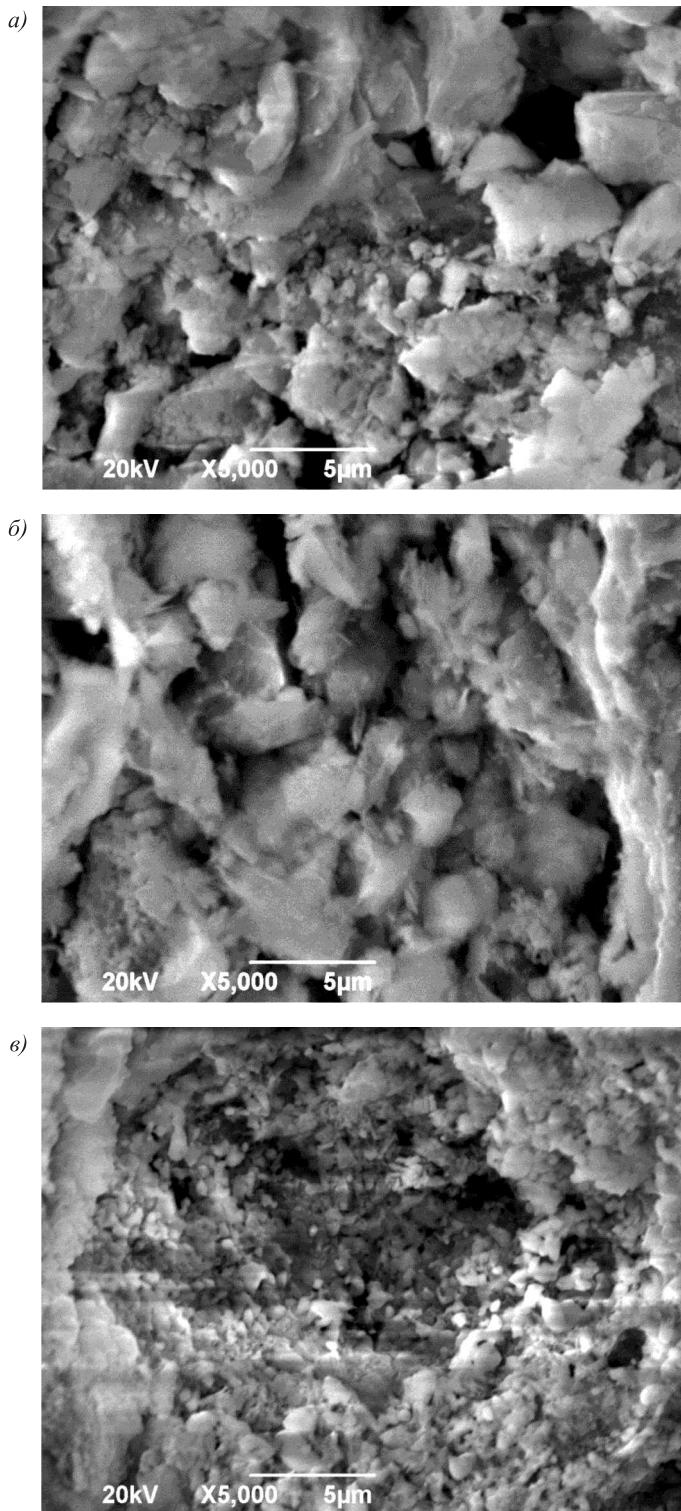
Показатели	Составы		
	1 _{МГ}	3 _{МГ}	7 _{МГ}
<i>Температура обжига 1000 °C</i>			
Предел прочности при сжатии, МПа	11,5	12,4	12,8
Предел прочности при изгибе, МПа	2,5	2,8	3,2
Морозостойкость, циклы	28	32	38
<i>Температура обжига 1050 °C</i>			
Предел прочности при сжатии, МПа	12,4	14,3	15,8
Предел прочности при изгибе, МПа	2,8	3,2	3,6
Морозостойкость, циклы	32	38	45

В табл. 7 представлены физико-механические показатели керамического кирпича (размером $250 \times 120 \times 65 \cdot 10^{-3}$ м), обожженного в интервале температур 1000–1050 °C.

Согласно требованиям ГОСТа 530–2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия», водопоглощение керамического кирпича должно быть не менее 6,0 %. Водопоглощение исследуемых кирпичей колеблется в пределах 12–15 %.

Микроструктура образцов, обожженных при температуре 1050 °C, представлена на рисунке.

Обсуждение результатов. Структурно-реологические свойства керамических масс. Преобладающее развитие быстрых эластичных деформаций (E_1) у масс из составов 4 и 8, содержащих наибольшее количество горелых пород и золы-уноса, свидетельствует о плохой формируемости и склонности к хрупкому разрушению структуры. Увеличение в составах глинистого компонента способствует развитию пластических деформаций (E_3) и выявляет склонность к пластическому разрушению и свилениеобразованию при формировании изделий (см. табл. 6, составы 1 и 5). При увеличении в составах керамических масс отощителей (горелых пород и золы-уноса) уменьшается предел текучести ($P \cdot 10^{-3}$, табл. 6). Пределом текучести называют механическую характеристику материала, напряжение, при котором деформации продолжают расти без увеличения нагрузки.



Микроструктура образцов составов: *a, б, в* – $1_{\text{МГ}}$,
 $3_{\text{МГ}}$, $7_{\text{МГ}}$ соответственно.

Увеличение $\times 5000$

Отличительной особенностью структуры массы из составов 4 и 8 является ее низкая способность к растяжению, причем более низкая у состава 4. Так, предел прочности δ у образцов состава 4 при формовочной влажности составляет $19,84 \cdot 10^{-3}$, а у состава 8 – $19,8 \cdot 10^{-3}$ Па (табл. 6). Предел прочности при растяжении δ у образцов на основе межсланцевой глины и золы-уноса сырья выше, чем у образцов с использованием межсланцевой глины и горелых пород. Присутствие в системе частиц размером от 3–5 до 100–150 мк, содержащихся в золе-уносе, способствует увеличению объема адсорбционно и хемосорбционно связываемой ими воды и уменьшению объема капиллярно-связанной и свободной воды, что приводит к повышению пластичности керамической массы и прочностных показателей.

Соответственно и относительная деформация ($E_{\text{отн}}$) при растяжении образцов на основе межсланцевой глины и горелых пород (табл. 6, составы 1–4) выше, чем на основе межсланцевой глины и золы-уноса (табл. 6, составы 5–8). С увеличением в составах керамических масс количества горелых пород $E_{\text{отн}}$ снижается (табл. 6), что свидетельствует о снижении связующей способности и низкой способности образцов составов 4 и 8 противостоять напряжениям, возникающим в процессе формования и сушки.

Анализ табл. 6 показывает, что содержание в шихте 60 % глинистых материалов способствует развитию в смеси пластической деформации (E_3) соответственно у образцов из составов 3 и 7 до 49,0 и 50,2 %, что придает шихте удовлетворительную формуемость, причем лучшая пластичность у состава 7, содержащего золу-унос. При дальнейшем увеличении содержания пластического компонента в составах пластические деформации приближаются по величине к пластическим деформациям глинистых материалов, а следовательно, предопределяют свилениеобразование в массе при формировании.

Состав 7, содержащий золу-унос в отличие от состава 3, содержащий горелые породы, характеризуется сравнительно высокой однородностью свойств, так как содержит более однородные частицы (размером от 3–5 до 100–150 мк). Так, коэффициент вариации (K_v) показателей пластической прочности, характеризующей однородность свойств массы, у состава 3 составляет 3,2, а у состава 7 – 4,0 (табл. 6). При увеличении содержания в шихте горелых пород коэффициент вариации снижается у образцов с 5,1 до 2,7 %, а с применением шлама с 5,8 до 3,6 %.

Экспериментальные исследования, проведенные в ВНИИстроме им. П.П. Будникова, определили, что для получения качественных изделий коэффициент вариации показателей свойств формовочных глиняных масс должен быть ниже 5 [12, 13].

Условный модуль деформации (E_2) выше у составов, содержащих золу-унос, что указывает на повышенную прочность связи частиц, а быстрая эластическая деформация (E_1) у составов, содержащих горелые породы (см. табл. 3). При увеличении влажности массы закономерно снижается наибольшая пластическая вязкость, условный модуль деформации (E_2), условный статический предел текучести и величина критерия B данного

состава. Критерий B предложен в работе [12, 13] для оценки качества керамических масс и выбора оптимального варианта сырьевых смесей:

$$B = (\lambda \eta \theta) / P_{\text{к1}},$$

где λ – медленная эластичность;

$P_{\text{к1}}$ – предел текучести;

η – вязкость;

θ – период истинной релаксации.

Установлено, что чем больше величина B [13, 14], тем качественнее по технологическим свойствам состав смеси. Снижение пластической вязкости, условных модуля деформации и статического предела текучести, а также величины критерия B объясняется уменьшением сил межмолекулярного притяжения вследствие развития сольватных слоев и появления в системе значительного количества свободной воды. Сольватные слои из дисперсионной среды вокруг капель эмульгированной жидкости играют роль защитных пленок, так как вследствие своей повышенной вязкости мешают слиянию капель. Уменьшение капиллярных сил объясняется ростом расстояний между частицами. Большого развития достигают сольватные слои в результате использования в керамических массах наночастиц, которые способствуют образованию больших молекул за счет агрегативной устойчивости коллоидных систем. Большие размеры молекул, несущие собственные сольватные оболочки, создают на поверхности частиц адсорбционно-сольватные слои большой протяженности и плотности. Устойчивость таких дисперсий близка к устойчивости истинно лиофильных систем. Системы со слабым взаимодействием между дисперсной фазой и дисперсионной средой называются – лиофобными коллоидами (золями), а с сильным взаимодействием – лиофильными. Если дисперсионной средой является вода, то системы называются соответственно гидрофобными и гидрофильными.

При увеличении влажности до 28 % пластическая прочность составов 4 и 8 уменьшается в 2–2,5 раза, при этом значительно снижается предел прочности при растяжении, что приведет к нарушению процесса формования и к искажению конфигурации изделий. Последнее можно устраниТЬ путем вылеживания керамической шихты.

Физико-механические и химические свойства керамического кирпича. Исследование физико-механических свойств керамических кирпичей проводили на оптимальных (по пластичности керамической массы) составах 3 и 7 (табл. 7). Например, использование горелых пород более 40 % в составах керамических масс на основе межсланцевой глины приводит к снижению пластичности керамической массы до 10–11 (менее 12), что способствует появлению трещин при прессовании кирпича.

Как видно из табл. 7, при температуре обжига 1000–1050 °С лучшие показатели имеют образцы состава 7, соответствующие всем требованиям ГОСТа. Таким образом, лучшие показатели имеют керамические кирпичи, содержащие нанотехногенное сырье (золу-унос).

При уменьшении размера зерен увеличивается общая величина поверхности раздела фаз, уменьшается средний радиус кривизны выпуклых участ-

ков, растет их избыточная поверхностная энергия, уменьшаются расстояния между источниками и поглотителями вакансий в системе [14].

Суммарный эффект этих факторов определяется тем, что теоретически рассчитанная скорость усадки по диффузионному механизму обратно пропорциональна $D^{6/5}$ (D – начальный диаметр частиц) [14].

Эффект от внедрения частиц размером от 3–5 до 100–150 мк принципиально выражается в том, что в системе появляется не только дополнительная граница раздела, но и носитель квантово-механических проявлений, что способствует повышению физико-механических показателей.

Экспериментальные исследования и богатый практический опыт керамических производств подтверждают важнейшую роль степени измельчения. За счет действия одного этого фактора удается в ряде случаев снизить требуемую температуру спекания на 200 °С и более [14].

Пористость керамического кирпича. Из рисунка видно, что в исследуемых образцах в основном встречаются поры трех типов: щелевидные, изометрические и поры, используя терминологию автора работы [15], причудливой формы. Кроме того, в образцах составов 1_{МГ} и 3_{МГ} (см. рисунок, а, б) присутствуют сравнительно крупные поры (до 40–45 мкм) овальной формы и изометрические поры типа «каналов». Именно эти поры, как считает автор работы [15], определяют водопоглощение керамических материалов.

В образцах состава 7 имеют место изолированные изометрические иногда овальные поры размером 3–10 мкм (рисунок, в). Узкие щелевидные поры и группы соединяющих пор весьма причудливой формы встречаются также в образцах состава 3 (рисунок, б). Наличие пор изометрической формы и овальной закрытой пористости, в отличие от вытянутых (щелевидных) пор, в керамических материалах придают им механическую прочность [15]. Изометрические закрытые поры присутствуют в образцах составов 1_{МГ}, 3_{МГ} и 7_{МГ}, но их значение в общей пористости структуры сравнительно невелико. Щелевидные поры, как правило, узкие (2–5 мкм), обычно изогнутые, серповидные, но иногда прямолинейные чаще встречаются в составе 1_{ГЦИ} (рисунок, а). Наличие пор и, следовательно, неоднородности материала неблагоприятно сказывается на свойства керамического кирпича. Вредное влияние на механическую прочность вытянутых (щелевидных) пор оценивается приблизительно в 5 раз больше, чем круглых [15]. Кроме того, наличие щелевидных пор предполагает неполное завершение процессов спекания [15].

Выводы. Таким образом, исследования показали существенные влияния количества золы-уноса и горелых пород на структурно-реологические свойства керамических масс для керамического кирпича.

1. Присутствие в системе частиц размером от 3–5 до 100–150 мк, содержащихся в золе-уносе, способствует увеличению объема адсорбционно и хемосорбционно связываемой ими воды и уменьшению объема капиллярно-связанной и свободной воды, что приводит к повышению пластичности керамической массы и прочностных показателей.

2. Анализ табл. 6 показывает, что содержание в шихте 60 % глинистых материалов способствует развитию в смеси пластической деформации (E_3) соответственно у образцов из составов 3 и 7 до 49,0 и 50,2 %, что придает

шихте удовлетворительную формуемость, причем лучшая пластичность у состава 7, содержащего золу-унос. При дальнейшем увеличении содержания пластического компонента в составах пластические деформации приближаются по величине к пластическим деформациям глинистых материалов, а следовательно, предопределяют свилениеобразование в массе при формировании.

При увеличении влажности до 28 % пластическая прочность составов, содержащих максимальное количество золы-уноса и горелых пород, уменьшается в 2–2,5 раза, при этом значительно снижается предел прочности при растяжении, что приведет к нарушению процесса формования и кискажению конфигурации изделий. Последнее можно устранить путем вылеживания керамической шихты. Эффект от внедрения наноразмерных частиц принципиально выражается в том, что в системе появляется не только дополнительная граница раздела, но и носитель квантово-механических проявлений, что способствует повышению физико-механических показателей. Исследования показали, что наличие пор изометрической формы и овальной закрытой пористости в керамических материалах придают им механическую прочность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kairakbaev A.K., Abdrahimov V.Z., Abdrahimova E.S., Kolpakov A.V. Study of the Effect of Al_2O_3 on Acid and Thermal Shock Resistance of Acid-Resistant Refractories Using a Regression Analysis Method // Refractories and Industrial Ceramics. 2015. Vol. 56. Issue 3. P. 276–280.
2. Abdrahimov V.Z., Abdrahimova E.S. Study of Phase Composition of Ceramic Materials Based on Nonferrous Metallurgy Chemical, and Petrochemical Industry Aluminum-Containing Waste // Refractories and Industrial Ceramics. 2015. Vol. 56. Issue 5. P. 5–10.
3. Чумаченко Н.Г., Коренькова С.Ф., Хлыстов А.И. Перспективы развития нанотехнологий в производстве строительных материалов на основе шламовых отходов // Пром. и гражд. стр-во. 2010. № 8. С. 20–21.
4. Абдрахимова Е.С. Влияние пирофиллита на структурно-реологические и усадочные свойства керамических масс для кислотоупоров // Новые огнеупоры. 2013. № 11. С. 53–56.
5. Сайбулатов С.Ж., Пиевский И.М., Степанова А.И., Нурбатуров К.А. Исследование реологических свойств и напряженного состояния зологлининных керамических масс в процессе сушки // Пром. теплотехника. 1982. Т. 4. № 3. С. 62–65.
6. Вялов С.С. Реологические основы механических грунтов. М.: Высш. шк., 1978. 447 с.
7. Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З., Абдрахимов А.В. Структурно-реологические свойства глинистых материалов различного химико-минерального состава // Материаловедение. 2004. № 3. С. 50–56.
8. Абдрахимов В.З. Реология самарских легкоплавких глин // Стройт. вестн. Рос. инж. академии. 2008. Вып. 9. С. 7–9.
9. Эйрих Р. Реология / пер. с англ. М.: ИЛ, 1962. 824 с.
10. Терзаги К. Теория механики грунтов. М.: Госстройиздат, 1961. 507 с.
11. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур. М.: Наука, 1966. 400 с.

12. Сайбулатов С.Ж., Сулейменов С.Т., Ралко А.В. Золокерамические стеновые материалы. Алма-Ата: Наука, 1983. 292 с.
13. Золотарский А.Е., Сайбулатов С.Ж., Яскевич Т.А. Структурно-механические свойства керамических масс на основе золы сухого отбора Ермаковской ГРЭС // Комплексное использование минерального сырья. 1980. № 11. С. 50–52.
14. Будников П.П., Балкевич В.Л., Бережной А.С., Булавин И.А., Куклев Г.В., Полубояринов Д.Н., Попильский Р.Я. Химическая технология керамики и огнеупоров. М.: Изд-во лит. по стр-ву, 1972. 552 с.
15. Павлов В.Ф. Физико-химические основы обжига изделий строительной керамики. М.: Стройиздат, 1977. 240 с.

Абдрахимов Владимир Закирович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: 3375892@mail.ru
Самарский государственный экономический университет

Получено после доработки 06.08.18

Abdrakhimov Vladimir Zakirovich, DSc, Professor; E-mail: 3375892@mail.ru
Samara State Economic University, Russia

THE STUDY OF STRUCTURAL AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF CERAMIC MASSES, PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES AND TEXTURE OF CERAMIC BRICKS ON THE BASIS OF OIL SHALE

Currently, natural raw materials resources are depleted, so it is necessary to involve waste in the production turnover for the manufacture of ceramic materials. This excludes the cost of exploration, construction and operation of quarries, exempt significant land from the impact of negative anthropogenic factors. “The purpose and objective of this work: to investigate on the basis of waste oil shale: inter-shale clay, burnt rocks and fly ash: a) structural and rheological properties of ceramic masses for the production of ceramic bricks; b) physical and mechanical properties; c) the structure of porosity.” The significant effects of the amount of fly ash and burnt rocks on the structural and rheological properties of ceramic masses for ceramic bricks are shown. With an increase in humidity up to 28 %, the plastic strength of compositions containing the maximum amount of fly ash and burnt rocks is reduced by 2–2,5 times, while the tensile strength is significantly reduced, which will lead to a violation of the molding process and to a distortion of the product configuration. The latter can be eliminated by curing the ceramic charge. Studies have shown that the presence of isometric pores and oval closed porosity, unlike elongated (slit-like) pores in ceramic materials give them mechanical strength.

Key words: waste of oil shale, inter-shale clay, burnt rocks, fly ash, rheological properties, porosity, ceramic brick.

REFERENCES

1. Kairakbaev A.K., Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S., Kolpakov A.V. Study of the Effect of Al_2O_3 on Acid and Thermal Shock Resistance

- of Acid-Resistant Refractories Using a Regression Analysis Method. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2015. Vol. 56. Issue 3. Pp. 276–280.
2. A b d r a k h i m o v V.Z., A b d r a k h i m o v a E.S. Study of Phase Composition of Ceramic Materials Based on Nonferrous Metallurgy Chemical, and Petrochemical Industry Aluminum-Containing Waste. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2015. Vol. 56. Issue 5. Pp. 5–10.
3. C h u m a c h e n k o N.G., K o r e n 'k o v a S.F., K h l y s t o v A.I. Perspektivy razvitiya nanotekhnologiy v proizvodstve stroitel'nykh materialov na osnove shlamovykh otkhodov [The prospects of development of nanotechnologies in production of construction materials based on waste recovering]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil construction]. 2010. No. 8. Pp. 20–21. (in Russian)
4. A b d r a k h i m o v a E.S. Vliyanie pirofillita na strukturno-reologicheskie i usadochnye svoystva keramicheskikh mass dlya kislotooporov [Influence of pyrophyllite on structural-rheological and shrinkage properties of ceramic masses for acidic fertilizers]. *Novye ogneupory* [New refractories]. 2013. No. 11. Pp. 53–56. (in Russian)
5. S a y b u l a t o v S.Zh., P i e v s k i y I.M., S t e p a n o v a A.I., N u r b a t u r o v K.A. Issledovanie reologicheskikh svoystv i napryazhennogo sostoyaniya zologlinskykh keramicheskikh mass v protsesse sushki [Investigation of the rheological properties and stress state of zologlineae ceramic masses during the drying process]. *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial heat engineering]. 1982. Vol. 4. No. 3. Pp. 62–65. (in Russian)
6. V y a l o v S.S. Reologicheskie osnovy mekhanicheskikh gruntov [Rheological basis of mechanical soils]. Moscow, Higher School, 1978. 447 p. (in Russian)
7. A b d r a k h i m o v a E.S., A b d r a k h i m o v V.Z., A b d r a k h i m o v A.V. Strukturno-reologicheskie svoystva glinistykh materialov razlichnogo khimiko-mineral'nogo sostava [Structural-rheological properties of clay materials of various chemical-mineral composition]. *Materialovedenie* [Materialovedenie]. 2004. No. 3. Pp. 50–56. (in Russian)
8. A b d r a k h i m o v V.Z. Reologiya samarskikh legkoplavkikh glin [Rheology of Samara low-melting clays]. *Stroitel'nyy vestnik Rossiyskoy inzhenernoy akademii* [Building Bulletin of the Russian Engineering Academy]. 2008. Issue 9. Pp. 7–9. (in Russian)
9. E y r i k h R. Reologiya [Rheology]. Transl. from English. Moscow, Il., 1962. 824 p. (in Russian)
10. T e r t s a g i K. Teoriya mekhaniki gruntov [Theory of soil mechanics]. Moscow, Gosstroyizdat, 1961. 507 p. (in Russian)
11. R e b i n d e r P.A. Fiziko-khimicheskaya mekhanika dispersnykh struktur [Physico-chemical mechanics of disperse structures]. Moscow, Nauka, 1966. 400 p. (in Russian)
12. S a y b u l a t o v S.Zh., S u l e y m e n o v S.T., R a l k o A.V. Zolokeramicheskie stenovye materialy [Ash ceramics wall materials]. Alma-Ata, Nauka, 1983. 292 p. (in Russian)
13. Z o l o t a r s k i y A.E., S a y b u l a t o v S.Zh., Y a s k e v i c h T.A. Strukturno-mekhanicheskie svoystva keramicheskikh mass na osnove zoly sukhogo otbora Ermakovskoy GRES [Structural and mechanical properties of ceramic masses on the basis of dry-run ash of Ermakovskaya Hydroelectric power station]. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya* [Complex use of mineral raw materials]. 1980. No. 11. Pp. 50–52. (in Russian)

14. Budnikov P.P., Balkovich V.L., Berezhnoy A.S., Bulavin I.A., Kukolev G.V., Poluboyarinov D.N., Popil'skiy R.Ya. Khimicheskaya tekhnologiya keramiki i ogneuporov [Chemical technology of ceramics and refractories]. Moscow, Publishing house of literature on construction, 1972. 552 p. (in Russian)
 15. Pavlov V.F. Fiziko-khimicheskie osnovy obzhiga izdeliy stroitel'noy keramiki [Physicochemical basis of firing products of building ceramics]. Moscow, Stroyizdat, 1977. 240 p. (in Russian)
-

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



УДК 699.86.003.1

Е.Г. МАЛЯВИНА, А.А. ФРОЛОВА

**ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ВЫБОРА ТЕПЛОЗАЩИТЫ ОФИСНЫХ ЗДАНИЙ**

На экономически целесообразное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций зданий оказывает влияние большое число факторов. Прежде всего это стоимости утепления и теплоты на отопление здания в холодный период года. Как показали проведенные исследования, для кондиционируемых зданий этого недостаточно. Результат зависит от режима работы здания во времени и тепловой нагрузки помещений на системы отопления и охлаждения. Поэтому, кроме указанных, значимыми факторами экономической целесообразности уровня теплозащиты признаны стоимость электроэнергии на выработку холода для охлаждения здания, стоимость систем отопления и охлаждения здания и стоимость присоединения к энергоснабжающим сетям. Полученный результат важно донести до профессионального сообщества в понятной и компактной форме. Обобщение результатов исследования выполнено на базе удельной теплозащитной характеристики здания, представляющей собой произведение общего коэффициента теплопередачи здания и коэффициента компактности. Общий коэффициент теплопередачи здания характеризует теплопотери и теплопоступления в здание через ограждающие конструкции, а коэффициент компактности может служить показателем площади поверхности здания, которая покрыта утеплителем. В качестве примера в представленной работе рассматриваются здания административно-офисного назначения в г. Москве с различными удельными теплопоступлениями от 0 до 80 Вт/м² на расчетной площади в рабочее время, которое продолжается с 9-00 до 18-00 ч. Для этих зданий выявлены зоны сочетаний совокупных дисконтрирующих затрат на все перечисленные выше составляющие и удельной теплозащитной характеристики здания, относящиеся к целесообразности определенного уровня теплозащиты.

Ключевые слова: стоимость утеплителя, стоимость системы отопления, стоимость системы охлаждения, стоимость присоединения к энергосетям, стоимость энергоносителей.

DOI 10.32683/0536–1052–2018–717–9–56–65

Экономический аспект выбора уровня теплозащиты зданий находится под пристальным вниманием специалистов [1–10]. Причем экономическая целесообразность дальнейшего повышения уровня теплозащиты часто ставится под сомнение [11, 12].

© Малявина Е.Г., Фролова А.А., 2018

В настоящее время значения базового уровня теплозащиты в Российской Федерации нормируются в СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий». Эти значения назначены волевым путем еще в предыдущих нормативных документах в 2000 г. для реализации требований энергосбережения в зданиях. Упомянутый нормативный документ разрешает понизить во вновь строящихся и реконструируемых зданиях сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций, если удельное потребление тепловой энергии на отопление и вентиляцию этих зданий за отопительный период укладывается в нормативные рамки. Кроме того, в реконструируемых зданиях, для которых по архитектурным или историческим причинам невозможно утепление стен снаружи, допускается применять теплозащиту, ограниченную санитарно-гигиеническими нормами.

Для выявления экономически целесообразной теплозащиты предлагается [13, 14] сравнивать различные варианты утепления зданий по совокупным дисконтированным затратам (СДЗ), причем в них учитываются все составляющие затрат, на которые влияет теплозащита здания. К ним отнесены [15, 16] стоимость утепления, стоимость систем отопления и охлаждения здания, стоимость присоединения этих систем к энергосетям, стоимость энергоносителей. Естественно, для выяснения указанных стоимостей энергоносителей и присоединения каждого рассматриваемого здания к энергоснабжающим сетям предварительно были выполнены расчеты энергопотребления зданиями в течение года в климатических условиях г. Москвы [17, 18].

Так как в результате исследований получены условия, при которых экономически целесообразны различные уровни теплозащиты, целью настоящей статьи является донесение этих результатов до профессионального сообщества в понятной и компактной форме.

Было рассмотрено три варианта теплозащиты здания, отличающихся друг от друга сопротивлением теплопередаче наружной стены и покрытия. Для варианта 1 сопротивления теплопередаче наружной стены и покрытия приближаются к уровню по санитарно-гигиеническим условиям. Вариант 3 теплозащиты соответствует базовому уровню по СП 50.13330.2012. Для варианта 2 сопротивления теплопередаче наружных стен и покрытий рассчитаны с применением понижающего коэффициента 0,63 для стен и 0,8 для покрытия по отношению к варианту 3, принятыми пороговыми в том же СП. Величины сопротивлений теплопередаче, $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$, для наружных ограждающих конструкций, соответствующие вариантам 1, 2 и 3 по нормативам г. Москвы, следующие: для наружных стен: 1,254; 1,754; 2,629; для покрытий: 1,371; 2,871; 3,621. Сопротивление теплопередаче окон во всех вариантах принято равным $0,54 \ m^2 \cdot ^\circ C / Вт$.

Для исследования приняты варианты размеров здания, отличающихся друг от друга различной длиной и различной этажностью. Ширина здания принята во всех случаях одинаковой и равной 20,2 м по наружному обмеру. Все торцевые стены глухие (без окон). Рассматривались здания, имеющие 3 и 12 этажей. Доля остекления продольных стен представлена в двух вариантах: 0,25; 0,55. Окна достаточно плотные, чтобы не учитывать инфильтрацию.

В зданиях находятся офисные помещения одинаковых размеров $6,8 \times 10,1 \times 3,9$ (h) м. Причем рассматривались помещения четырех видов: рядовые промежуточных этажей, рядовые верхнего этажа, угловые на промежуточных этажах, угловые на верхнем этаже для выявления различного энергопотребления системами поддержания в них заданного теплового микроклимата.

Представленные ниже результаты относятся к зданиям с различными удельными внутренними теплопоступлениями от 0 до 80 Вт/м² при круглогодичном поддержании в помещениях здания допускаемых температурных условий от 18 до 24 °С (по результирующей температуре) в течение рабочего времени с 9 до 18 ч.

Таким образом, было рассмотрено около 200 вариантов зданий, отличающихся друг от друга размерами, теплозащитой, долей остекления фасада здания и уровнем внутренних теплопоступлений.

Расчеты энергопотребления системами поддержания допускаемых температурных условий выполнялись при семи различных значениях температуры наружного воздуха в течение года: от расчетной для отопления до расчетной для кондиционирования воздуха в теплый период года. Таким образом, весь год был разделен на 7 интервалов, в которых выбранные для расчета температуры являлись серединами. Продолжительность наблюдения температуры в каждом интервале определялась по справочному пособию к СНиП 23-01-99*¹.

Для более полного использования имеющихся теплопоступлений в помещении в отопительный период решено поддерживать результирующую температуру в течение всего рабочего дня от 18 до 24 °С и в интервале 22–24 °С в рабочее время теплого периода года.

На мощность отопления при любой температуре наружного воздуха накладываются два ограничения. Во-первых, она не должна превосходить мощность отопления, поддерживающего круглосуточно в помещении температуру 20 °С. Во-вторых, температура помещения к началу рабочего дня не должна быть ниже 18 °С, а к концу рабочего времени выше 24 °С. Потоки охлаждения подбирались для каждого конкретного варианта расчета индивидуально. При этом температура помещения в течение всего дня не превышала 24 °С.

Считается, что все теплоизбытки снимаются вентиляторными теплообменниками (фанкойлами). Принято, что конденсаторы холодильной машины охлаждаются 40%-ным раствором этиленгликоля, циркулирующего через установленную во дворе здания или на его кровле сухую градирню (драйкулер). В отдельные периоды года охлаждение осуществляется путем искусственного или естественного охлаждения. Причем естественное охлаждение понимается как применение в фанкойлах воды, охлажденной в драйкулере. При расчетах принималось, что естественное охлаждение используется при температуре наружного воздуха не выше +5 °С.

Обращается внимание на то, что в расчете учитывалась только потребность зданий в теплоте и холоде на поддержание заданного теплового мик-

¹ Строительная климатология: Справ. пособие к СНиП 23-01-99* / под ред. чл.-кор. В.К. Савина. М.: НИИ строительной физики РААСН, 2006.

роклимате помещений. Никакие потери из-за неэффективности работы и дополнительные затраты энергии на приготовление требуемых теплоносителей систем отопления и охлаждения не рассматривались. В дальнейшем при использовании на практике полученных результатов потребитель может учесть стоимость известных ему потерь энергии в каждом конкретном случае.

Результаты экономических расчетов были обобщены на графиках, в зависимости от удельной теплозащитной характеристики здания $k_{об}$, которая равна произведению коэффициентов компактности и общего коэффициента теплопередачи здания. На рис. 1 представлены графики с зонами сочетаний $k_{об}$ и СДЗ, относящимися к экономической выгоде одного из трех вариантов теплозащиты при поддержании в здании допустимых температурных условий.

Стоимость утепления здания влияет на выгодность варианта утепления в противофазе к стоимостям всех остальных составляющих затрат [13]. Это следует из того, что чем более мощная теплозащита, тем дешевле все остальное. Поэтому обобщенные зоны выгоды вариантов утепления в зависимости от $k_{об}$ определены при наиболее низких, средних и высоких стоимостях утепления.

Как видно из рис. 1, некоторые расчетные точки, относящиеся к теплозащите одного уровня, попадают в зоны экономически целесообразного утепления зданий другого уровня вблизи указанных границ между зонами. Это свидетельствует о том, что границы между зонами целесообразной теплозащиты могут незначительно сдвигаться в ту или иную сторону из-за отличающегося изменения в течение рабочего дня температуры внутреннего воздуха помещений в различных вариантах расчета. Различное изменение температуры помещений в пределах допустимых норм по-разному влияло на учет энергопотребления системами поддержания микроклимата в них.

Представленные графики на рис. 1 подтверждают известный тезис о том, что чем дешевле утепление, тем выгоднее вариант усиленного утепления. Из графиков также видно, что теплозащита по санитарно-гигиеническим условиям выгодна при меньших значениях СДЗ/м², т. е. при близких к минимальным стоимостям систем отопления и охлаждения, при соединении их к энергоснабжающим сетям, теплоты и электроэнергии. Причем чем дороже теплозащита, тем при более высокой цене перечисленных затрат вариант теплозащиты по санитарно-гигиеническим условиям остается выгодным. Интересно еще и то, что в зданиях небольшого объема (с высокими значениями $k_{об}$) теплозащита по санитарно-гигиеническим условиям выгодна при более высоких СДЗ/м², чем в зданиях большего объема.

Если принять норму дисконта не 10 %, а 5 %, то как показали расчеты, кардинально ничего не изменяется. Уменьшились только значения СДЗ.

Если в совокупных дисконтированных затратах учитывать только стоимость утепления и теплоты, то картина экономически целесообразных зон сопротивлений теплопередаче здания окажется совершенно дру-

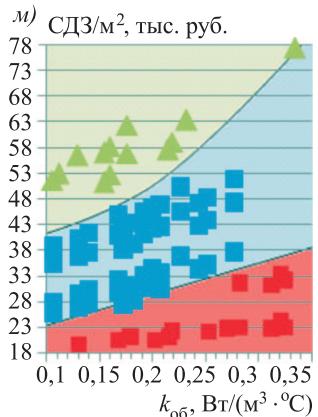
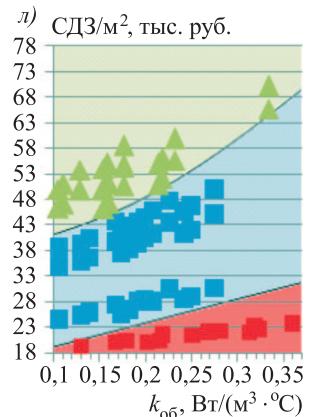
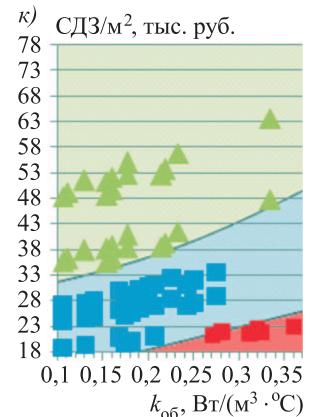
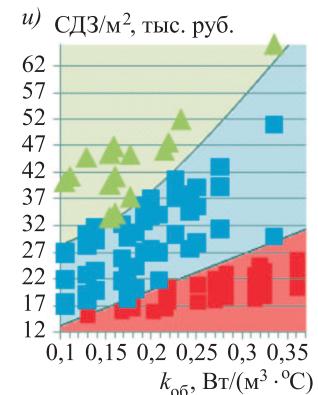
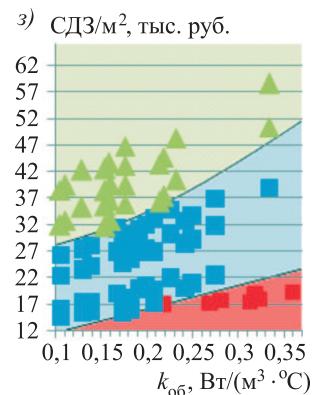
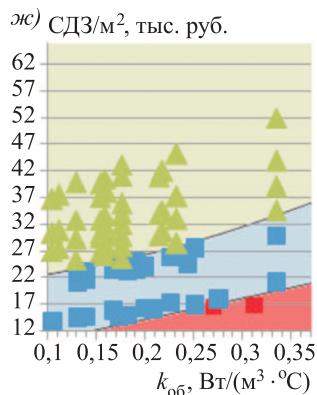
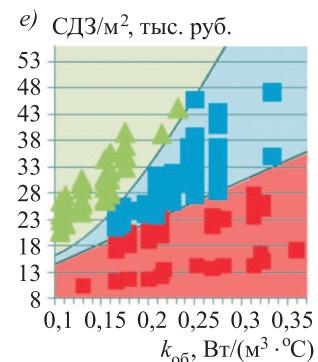
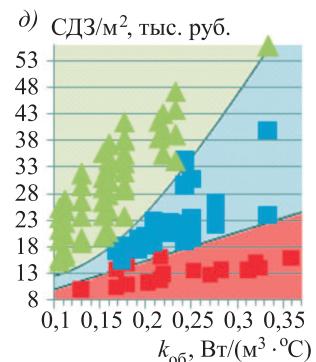
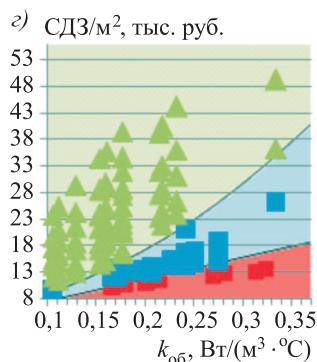
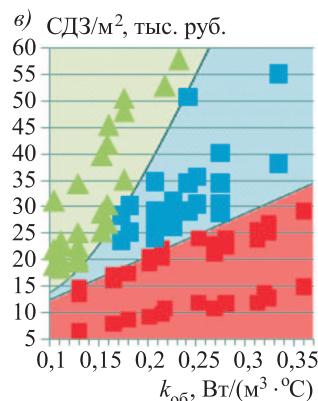
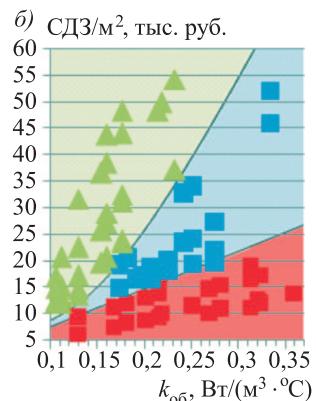
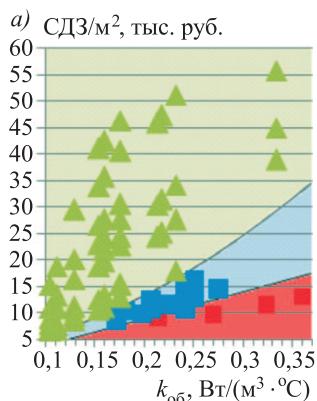


Рис. 1. Экономически целесообразные варианты утепления зданий

(вариант 1 – красный, вариант 2 – синий, вариант 3 – зеленый) при изменении удельной теплоизоляционной характеристики зданий $k_{об}$, $\text{Bt}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, при стоимости утепления 9 000 руб./ м^3 ($a, g, ж, к$); при стоимости утепления 15 000 руб./ м^3 ($b, d, з, л$); при стоимости утепления 22 000 руб./ м^3 ($v, e, u, м$). При внутренних теплопоступлениях a, b, v – 0–10 $\text{Bt}/\text{м}^2$; g, d, e – 15–30 $\text{Bt}/\text{м}^2$; $ж, з, u$ – 40–50 $\text{Bt}/\text{м}^2$; $к, л, м$ – 60–80 $\text{Bt}/\text{м}^2$, при норме дисконта 10 %



гой. Некоторые результаты такого расчета показаны на рис. 2. Эти результаты подтверждают то, что для правильной оценки целесообразности определенного уровня теплозащиты необходимо учитывать все составляющие затрат на круглогодичное поддержание микроклимата в помещениях офисного здания. Для зданий, в которых круглогодично поддерживаются требуемые параметры микроклимата, выяснить экономически целесообразный вариант теплозащиты только по сравнению затрат на утепление здания и на его отопление, по меньшей мере, некорректно. Следует учитывать все составляющие капитальных и эксплуатационных затрат, что доказывается сравнением рис. 1 и 2.

Таким образом, для экономического обоснования уровня теплозащиты зданий с внутренними тепловыделениями, в которых параметры внутренней среды поддерживаются круглогодично, необходимо рассматривать энергоза-

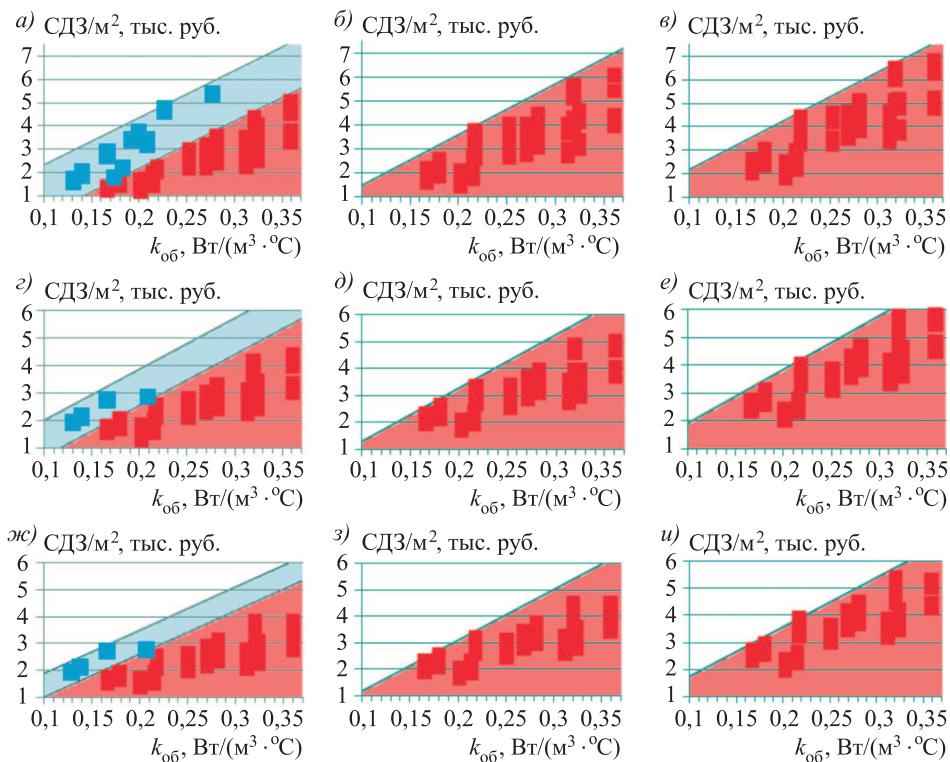


Рис. 2. Зоны экономически целесообразных вариантов утепления зданий (вариант 1 – красный, вариант 2 – синий, вариант 3 – зеленый) при стоимости утепления $a, г, ж – 9 000 \text{ руб.}/\text{м}^3$; $b, д, з – 15 000 \text{ руб.}/\text{м}^3$; $v, е, у – 22 000 \text{ руб.}/\text{м}^3$; при внутренних теплопоступлениях $a, б, в$ – 0–10 $\text{Bt}/\text{м}^2$; $г, д, е$ – 15–30 $\text{Bt}/\text{м}^2$; $ж, з, у$ – 40–50 $\text{Bt}/\text{м}^2$; $к, л, м$ – 60–80 $\text{Bt}/\text{м}^2$, при норме дисконта 10 %

траты на протяжении всего года: не только на отопление здания, но и на охлаждение. Следует учитывать все издержки, на которые влияет теплозащита здания, в качестве капитальных затрат – стоимости утепления здания, оборудования отопления и охлаждения, присоединения систем к энергоснабжающим сетям, в качестве эксплуатационных затрат – стоимости теплоты, электроэнергии и амортизационные отчисления.

Учет изменения нормы дисконта при расчете СДЗ от 5 до 10 % не приводит к сколько-нибудь ощутимому изменению зон целесообразности выбора уровня теплозащиты.

Вывод. Утепление по базовому варианту во всех зданиях выгодно при высоких значениях СДЗ/м², т.е. при более дорогих системах отопления и охлаждения, больших стоимостях присоединения к энергосетям и высокой стоимости теплоты и электроэнергии; теплозащита по санитарно-гигиеническим условиям выгодна при меньших значениях СДЗ/м². Чем дороже теплозащита, тем при более высокой цене перечисленных составляющих вариант теплозащиты по санитарно-гигиеническим условиям остается выгодным. Чем дешевле утепление здания, тем выгоднее вариант усиленного утепления. В зданиях небольшого объема теплозащита по санитарно-гигиеническим условиям выгодна при более высоких СДЗ/м², чем в зданиях большего объема.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Муравьев П.А., Лукина-Лебедева М.А., Таракин А.В., Горшков А.С. Определение оптимальной толщины слоя теплоизоляции для наружных стен жилого многоквартирного здания // Кровельные и изоляционные материалы. 2017. № 1. С. 21–29.
2. Лаптева С.И., Полякова М.З. Определение совокупных дисконтированных затрат при сравнении вариантов теплозащиты несветопрозрачных ограждений // Экономика и предпринимательство. 2017. № 10 – 1 (876 – 1). С. 724–727.
3. Макарова О.П., Красильникова Г.В. Экономическое обоснование вариантов утепления наружных ограждающих конструкций // Сб. статей. Современные проблемы и перспективы социально-экономического развития предприятий, отраслей, регионов. Йошкар-Ола: Приволж. гос. технол. ун-т, 2016. С. 37–41.
4. Васильев Г.П. Эффективная теплозащита – дань моде или экономическая необходимость? // Энергосбережение. 2011. № 6. С. 14–23.
5. Резанов Е.М., Петров П.В. К вопросу повышения эффективности утепления тепловой изоляцией наружных ограждающих конструкций стен зданий // Сб. статей конф. Актуальные вопросы энергетики. Омск, 2017. С. 18–21.
6. Hong T., Le Yang, Hill D. et al. Data and analytics to inform energy retrofit of high performance buildings // Applied Energy. 2014. No. 126. P. 90–106.
7. Orr H., Wang J., Fetsch D., Dumont R. Technical note: Airtightness of older-generation energy-efficient houses in Saskatoon // Journal of Building Physics. 2013. No. 36. P. 294–307.
8. D’Orazio M., Perna C.Di., Giuseppe E.Di, Morodo M. Thermal performance of an insulated roof with reflective insulation: Field tests under hot climatic conditions // Journal of Building Physics. 2013. No. 36. P. 229–246.
9. Asadi S., Hassan M.M., Beheshti A. Performance evaluation of an attic radiant barrier system using three-dimensional transient finite element method // Journal of Building Physics. 2013. No. 36. P. 247–264.

10. Cheng Y., Nin J., Gao N. Thermal comfort models: A review and numerical investigation // Building and Environment. 2012. No. 47. P. 13–22.
11. Скорик Т.А., Глазунова Е.К., Безуглый А.В. Разработка алгоритма расчета показателей тепловой защиты зданий // Сб. трудов конф. Транспорт-2017. Ростов н/Д: Ростов. гос. ун-т путей сообщения, 2017. С. 163–167.
12. Толстова Ю.И. Тепловая защита зданий и сооружений – экономический подход // Сб. трудов конф. Энергосбережение и энергоэффективность на промышленных предприятиях и в жилищно-коммунальном хозяйстве. Новосибирск, 2017. С. 188–194.
13. Маявина Е.Г., Фролова А.А. Энергетическая и экономическая оценка теплозащиты офисного здания // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 8. С. 64–69.
14. Маявина Е.Г., Фролова А.А. Определение экономически целесообразной теплозащиты офисного здания со значительными теплоизбыtkами // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2017. № 2. С. 88–91.
15. Маявина Е.Г., Фролова А.А. Экономическое сравнение вариантов перехода на свободное охлаждение кондиционируемых помещений // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 4. С. 78–83.
16. Фролова А.А., Савина А.В., Астанина О.В., Барбарова А.Н. Определение усредненных стоимостных показателей системы отопления // Успехи современной науки и образования. 2016. Т. 5. № 12. С. 62–64.
17. Маявина Е.Г., Фролова А.А. Анализ годового энергопотребления на отопление и охлаждение офисного здания // АВОК. 2017. № 1. С. 18–23.
18. Маявина Е.Г., Фролова А.А. Расчет энергетически целесообразной температуры наружного воздуха для перехода на свободное охлаждение кондиционируемых помещений // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 11–12. С. 71–78.

Маявина Елена Георгиевна, канд. техн. наук, проф.; E-mail: emal@list.ru
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Фролова Анастасия Анатольевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: FrolovaAA@mgsu.ru
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Получено 31.08.18

Malyavina Elena Georgievna, PhD, Professor; E-mail: emal@list.ru
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

Frolova Anastasiya Anatol'evna, PhD, Ass. Professor; E-mail: FrolovaAA@mgsu.ru
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

ECONOMIC JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF THE THERMAL PROTECTION OF OFFICE BUILDINGS

A large number of factors influence the economically feasible heat transfer resistance of the building enclosing structures. First of all, it is the cost of insulation and heat for the building heating in the cold season. As shown by studies, it is not enough for air-conditioned buildings. The result depends on the mode of the building operation in time and the heat load on the heating and cooling systems. Therefore, in addition to these significant factors of economic feasibility of the thermal protection level, there are the cost of electricity for the production of cold for cooling the building, the cost of the

building heating and cooling systems and the cost of connection to power supply networks. The got result is important to convey to the professional community in a clear and compact form. In the present work the buildings of administrative and office purpose are considered, the working day of which lasts from 9-00 to 18-00 hours with different specific heat supply from 0 to 80 W/m² on the estimated area during working hours. Generalization of the research results is made on the basis of specific heat protection characteristics of the building, which is a product of the overall heat transfer coefficient of the building and the compactness coefficient. The total heat transfer coefficient of the building characterizes the heat losses and the heat inflows to the building through the enclosing structures, and the compactness coefficient can serve as an indicator of the surface area of the building, which is covered with insulation. For these buildings provision has been made for identification of the areas of the total discounted cost combination for all of the above components and the specific heat protection characteristics of the building relating to the feasibility of the specified level of the thermal protection.

K e y w o r d s: insulation cost, the cost of the heating system, the cost of the cooling system, the cost of connection to the energy networks, the cost of energy carriers.

REFERENCES

1. Murav'ev P.A., Lukina-Lebedeva M.A., Tarakin A.V., Gorshkov A.S. Opredelenie optimal'noy tolshchiny sloya teploizolyatsii dlya naruzhnykh sten zhilogo mnogokvartirnogo zdaniya [Determination of the optimal thickness of the insulation layer for the exterior walls of a residential apartment building]. Krovel'nye i izolyatsionnye materialy [Roofing and insulation materials]. 2017. No. 1. Pp. 21–29. (in Russian)
2. Lapteva S.I., Polyakova M.Z. Opredelenie sovokupnykh diskontirovannykh zatrat pri sravnennii variantov teplozashchity nesvetoprozrachnykh ograzhdeniy [Determination of total discounted costs when comparing options for thermal protection of non-translucent fences]. Ekonomika i predprinimatel'stvo [Economy and Entrepreneurship]. 2017. No. 10 – 1 (876 – 1). Pp. 724–727. (in Russian)
3. Makarova O.P., Krasil'nikova G.V. Ekonomicheskoe obosnovanie variantov utepleniya naruzhnykh ograzhdayushchikh konstruktsiy [The economic rationale for options for insulation of external enclosing structures]. Sb. statey. Sovremennye problemy i perspektivy sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya predpriyatiy, otrazley, regionov [Digest of articles. Modern problems and prospects of socio-economic development of enterprises, industries, regions]. Ioshkar-Ola: Volga State University of Technology, 2016. Pp. 37–41. (in Russian)
4. Vasilev G.P. Effektivnaya teplozashchita – dan' mode ili ekonomicheskaya neobkhodimost'? [Effective thermal protection – a tribute to fashion or an economic necessity?] Energosberezenie [Energy saving]. 2011. No. 6. Pp. 14–23. (in Russian)
5. Rezanov E.M., Petrov P.V. K voprosu povysheniya effektivnosti utepleniya teplovoy izolyatsiei naruzhnykh ograzhdayushchikh konstruktsiy sten zdaniy [On the issue of improving the efficiency of thermal insulation thermal insulation of the outer walling of the walls of buildings]. Sbornik statey konferentsii. Aktual'nye voprosy energetiki [Collection of articles of the conference. Current issues of energy]. Omsk, 2017. Pp. 18–21. (in Russian)
6. Hong T., Le Yang, Hill D. et al. Data and analytics to inform energy retrofit of high performance buildings. Applied Energy. 2014. No. 126. Pp. 90–106.
7. Orr H., Wang J., Fetsch D., Dumont R. Technical note: Airtightness of older-generation energy-efficient houses in Saskatoon. Journal of Building Physics. 2013. No. 36. Pp. 294–307.

8. D’Orazio M., Perna C.Di., Giuseppe E.Di., Morodo M. Thermal performance of an insulated roof with reflective insulation: Field tests under hot climatic conditions. *Journal of Building Physics*. 2013. No. 36. Pp. 229–246.
9. Asadi S., Hassan M.M., Beheshti A. Performance evaluation of an attic radiant barrier system using three-dimensional transient finite element method. *Journal of Building Physics*. 2013. No. 36. Pp. 247—264.
10. Cheng Y., Nin J., Gao N. Thermal comfort models: A review and numerical investigation. *Building and Environment*. 2012. No. 47. Pp. 13–22.
11. Skorik T.A., Glazunova E.K., Bezuglyy A.V. Razrabotka algoritma rascheta pokazateley teplovoy zashchity zdaniy [Development of an algorithm for calculating indicators of thermal protection of buildings]. *Sbornik trudov konferentsii. Transport-2017* [Collection of conference proceedings. Transportation-2017]. Rostov-on-Don: Rostov State Transport University, 2017. Pp. 163–167. (in Russian)
12. Tolstova Yu.I. Teplovaya zashchita zdaniy i sooruzheniy – ekonomicheskiy podkhod [Thermal protection of building and structures – economic approach]. *Sbornik trudov konferentsii. Energosberezhenie i energoeffektivnost’ na promyshlennyykh predpriyatiyakh i v zhilishchno-kommunal’nom khozyaystve* [Collection of conference proceedings. Energy saving and energy efficiency at industrial enterprises and in housing and communal services]. Novosibirsk, 2017. Pp. 188–194. (in Russian)
13. Malyavina E.G., Frolova A.A. Energeticheskaya i ekonomiceskaya otseinka teplozashchity ofisnogo zdaniya [Energy and economic assessment of thermal protection of an office building]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova* [Bulletin of BSTU]. 2017. No. 8. Pp. 64–69. (in Russian)
14. Malyavina E.G., Frolova A.A. Opredelenie ekonomicheski tselesoobraznoy teplozashchity ofisnogo zdaniya so znachitel’nymi teploizbytkami [Determination of economically reasonable heat-shielding of the office building with considerable heatexcesses]. *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie* [Sanitary Engineering, Heating, Air Conditioning]. 2017. No. 2. Pp. 88–91. (in Russian)
15. Malyavina E.G., Frolova A.A. Ekonomiceskoe srovnenie variantov perekhoda na svobodnoe okhlazhdenie konditsioniruemikh pomeshcheniy [Economic comparison of the variants of the transfer to free cooling of the rooms with air conditioning]. *Izvestiya vuzov. Stroitel’stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2013. No. 4. Pp. 78–83. (in Russian)
16. Frolova A.A., Savina A.V., Astanina O.V., Barbarova A.N. Opredelenie usrednennykh stoimostnykh pokazateley sistemy otopleniya [Analysis of average cost parameters of a heating system]. *Uspekhi sovremennoy nauki i obrazovaniya* [Success of the modern science and education]. 2016. Vol. 5. No. 12. Pp. 62–64. (in Russian)
17. Malyavina E.G., Frolova A.A. Analiz godovogo energopotrebleniya na otoplenie i okhlazhdenie ofisnogo zdaniya [Analysis of the year power consumption for heating and cooling of an office building]. *AVOK* [AVOK]. 2017. No. 1. Pp. 18–23. (in Russian)
18. Malyavina E.G., Frolova A.A. Raschet energeticheski tselesoobraznoy temperatury naruzhnogo vozdukh dlya perekhoda na svobodnoe okhlazhdenie konditsioniruemikh pomeshcheniy [Calculation of energetically expediency external air temperature for transition to free cooling of conditioned rooms]. *Izvestiya vuzov. Stroitel’stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2012. No. 11/12. Pp. 71–78. (in Russian)

УДК 697.442.8

П.О. МАРТЫНОВ, Г.М. АХМЕРОВА, Я.Д. ЗОЛОТОНОСОВ,
А.Г. БАГОУТДИНОВА

ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СЕКЦИОННОГО ЗМЕЕВИКОВОГО ВОДОПОДОГРЕВАТЕЛЯ В СИСТЕМЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО ПУНКТА

Рассматривается возможность использования секционного конического змеевикового теплообменника в индивидуальных тепловых пунктах зданий для решения задач повышения качества и надежности работы теплотехнологических систем зданий и системы теплоснабжения в целом. Полученные результаты могут быть использованы для повышения энергоэффективности индивидуальных тепловых пунктов зданий, а качественный подбор оборудования позволит минимизировать не только расходы сетевой воды, затраты на потребляемую электрическую мощность, но и затраты потребителей.

Ключевые слова: энергосбережение, индивидуальные тепловые пункты, централизованное теплоснабжение, теплообменник.

DOI 10.32683/0536–1052–2018–717–9–66–74

В России тема ресурсопотребления в коммунальной сфере стоит очень остро, так как уровень энергоемкости в жилищном секторе страны в 1,5–2 раза выше, чем в государствах с похожим климатом, например, в Канаде. Отсутствие ремонтов многоквартирных домов и инженерного оборудования в течение длительного времени привело к высокому потреблению энергоресурсов в жилищном секторе.

В то же время ежегодный рост тарифов содействует внедрению следующих ресурсосберегающих мероприятий в сфере ЖКХ:

- ремонту внутридомовых систем отопления и горячего водоснабжения;
- автоматизации тепловых пунктов;
- переходу на индивидуальные тепловые пункты (ИТП) вместо центральных (ЦТП) (перенос оборудования приготовления горячей воды на бытовые нужды здания);
- оснащению индивидуальными автоматическими регуляторами теплового пункта отопительными приборами (термостатами) [1, 2].

Выбор схемы присоединения подогревателей горячего водоснабжения определяется принятым температурным графиком и удельным расходом горячей воды на бытовые нужды [3, 4].

Основное требование при выборе схемы подогревателей горячего водоснабжения – соответствие между подачей тепла на отопление и теплопотерями зданий. Второе требование – обеспечение минимального расхода сетевой воды, позволяющее иметь минимальные диаметры трубопроводов, каналов и минимальный расход электроэнергии на перекачку теплоносителя [5–8].

© Мартынов П.О., Ахмерова Г.М., Золотоносов Я.Д., Багоутдинова А.Г.,
2018

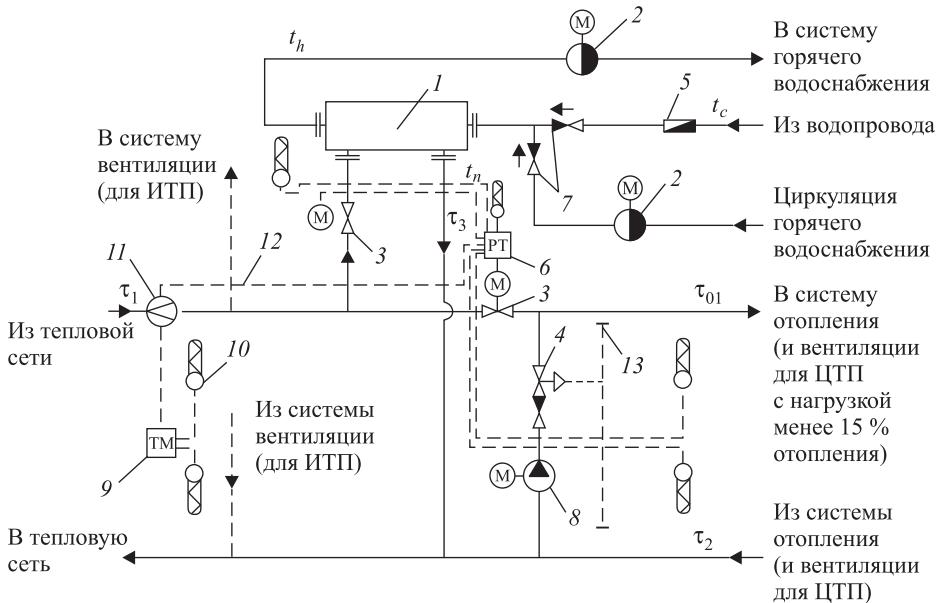


Рис. 1. Одноступенчатая система присоединения водоподогревателей горячего водоснабжения с автоматическим регулированием расхода теплоты на отопление и зависимым присоединением систем отопления в ЦТП и ИТП

Первое требование лучше всего удовлетворяется при присоединении абонентских установок по параллельной схеме (рис. 1), когда поддерживается постоянный расход сетевой воды на отопительные установки. Кроме того, по этой схеме система отопления получает постоянный расход сетевой воды, независимый от переменного расхода сетевой воды на горячее водоснабжение.

Однако эта схема в полной мере не обеспечивает выполнения второго требования [9].

Наиболее широкое распространение получили двухступенчатые схемы. Основное преимущество таких схем – использование в первой ступени обратной воды из систем отопления температурой 40–70 °C. В связи с этим значительно уменьшается расход сетевой воды.

Двухступенчатые подогреватели внедрялись, когда системы отопления на абонентских вводах практически нигде не регулировались. Теперь погодное регулирование в тепловом пункте здания стало правилом.

Некоторые специалисты [8, 10] считают, что в тепловых пунктах зданий с водоподогревателями горячего водоснабжения при использовании современных противоточных теплообменных аппаратов, рассчитанных с рабочей разностью температур на холодном конце 10 °C, целесообразно применение одноступенчатых теплообменных аппаратов, присоединенных к тепловой сети параллельно системам отопления, что позволяет функционировать блоку горячего водоснабжения при наличии автоматики погодного регулирования. При этом расходы сетевой воды не превышают значений, характерных для двухступенчатых водоподогревателей, работа которых при наличии автоматики погодного регулирования не обеспечивает требуемой температуры горячей воды.

В тепловых пунктах при закрытых схемах могут быть установлены водоподогреватели различных типов и конструкций. Мы рассматриваем рекупе-

ративные теплообменные аппараты, в которых теплота от горячего теплоносителя к холодному передается через разделительную стенку. Традиционно к установке в ИТП принимаются пластинчатые теплообменники, поставляемые в основном европейскими производителями, имеющими производственные площадки в России. Но ни отечественные, ни европейские компании в сфере пластинчатых теплообменников на данный момент каких-либо уникальных технологий не предлагают [10].

Следует отметить, что пластинчатые теплообменники изначально были разработаны для условий эксплуатации, когда жесткость подпиточной воды составляет менее 0,1 мг-экв/л (для тепловых сетей России жесткость подпиточной воды составляет 0,7 мг-экв/л). Кроме того, разборные пластинчатые теплообменники имеют сложную конструкцию проточной части и систему многочисленных kleевых резиновых уплотнительных прокладок, составляющих порядка 30 % полной стоимости нового пластинчатого теплообменника [11].

В связи с этим была рассмотрена возможность использования в системе ИТП секционных змеевиковых теплообменников типа «труба в трубе» [12]. Для этого предварительно были проведены исследования по оценке эффективности змеевиковых цилиндрического и конического секционных теплообменников. В табл. 1 [12] представлены результаты сопоставления секционных змеевиковых теплообменных аппаратов.

Как следует из результатов расчетов (табл. 1) наиболее перспективным является змеевиковый конический секционный теплообменник [13], представляющий собой усеченный конус (рис. 2), нижнее основание которого равно 650 мм, верхнее – 330, высота 1040 мм, поверхность теплообмена аппарата – 2,97 м².

Внутри внешней трубы диаметром 80 мм, выполненной из нержавеющей стали, смонтирован пучок труб, состоящий из четырех медных змеевиковых

Т а б л и ц а 1. Характеристики секционных змеевиковых аппаратов

Параметр	Цилиндрический секционный змеевик	Конический змеевиковый теплообменник			
		$\varphi = \pi/10$	$\varphi = \pi/12$	$\varphi = \pi/18$	$\varphi = \pi/20$
d_1 , м	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
D , м	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
D_{3M}^1 , м	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2
D_{3M}^N , м	0,6	0,76	0,69	0,56	0,53
G_1 , кг/ч	11767	11622	11650	11622	11622
G_2 , кг/ч	5925,3	5852,1	5866,6	5852	5852,1
Q , кВт	345,5	339,8	340,6	340	339,8
α_1 , Вт/(м ² · К)	7814,5	8606	8871	9417	9563
α_2 , Вт/(м ² · К)	6987	7194	7283	7439	7483
k , Вт/(м ² · К)	3284	3448	3512	3636	3669
F , м ²	2,08	1,92	1,885	1,82	1,8
L , м ²	7,985	7,62	7,5	7,23	7,16

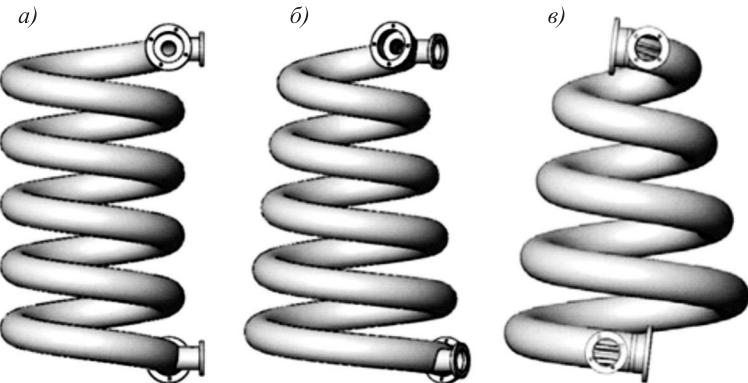


Рис. 2. Змеевиковые теплообменники типа «труба в трубе»
а – цилиндрический; б – конический; в – конический секционный

теплообменных элементов с внутренним диаметром 20 мм и толщиной стенок 1,5 мм. Концы элементов пучка закреплены в отверстиях трубных решеток по шестиграннику с помощью сварки плотным швом. Класс предлагаемых теплообменников рассматривается как предмет импортозамещения пластинчатым аппаратом.

Реализацию задачи предлагаемой оптимизации работы ИТП рассмотрим на примере 14-этажного жилого дома в Казани.

Согласно ранее существующему проекту подключения жилого дома к системам водоснабжения был установлен 3-секционный кожухотрубчатый теплообменник общей теплообменной поверхностью порядка 12,7 (рис. 3), выполненный



Рис. 3. Общий вид ИТП с секционным змеевиковым теплообменником

Т а б л и ц а 2. Расчетные значения геометрических параметров конического змеевикового аппарата в зависимости от теплогидродинамических характеристик процесса теплообмена

Температура горячего теплоносителя $t = 95^{\circ}\text{C}$		Температура горячего теплоносителя $t = 75^{\circ}\text{C}$		
Материал теплообменных элементов		Материал теплообменных элементов		
	Углеродистая сталь	Медь	Углеродистая сталь	Медь
1	19,26	16,98	17,24	15,34
2	1,20	1,13	1,14	1,01
3	0,83	0,784	0,80	0,75
4	7,52	7,05	7,10	6,70
5	8481	8603	7808	7914
6	7664	7686	7,024	7047
7	3526	4000	3272	3677
8	77	77	64	64
1	12,60	11,6	13,27	11,88
2	0,97	0,91	0,98	0,94
3	0,68	0,64	0,704	0,67
4	6,10	5,67	6,24	5,89
5	8893	9031	8053	8168
6	7564	7593	6991	7018
7	3578	4067	3309	3725
8	69	69	60	60
1	10,41	9,15	10,37	9,21
2	0,88	0,82	0,88	0,82
3	0,62	0,59	0,63	0,59
4	5,50	5,10	5,5	5,2
5	9108	9252	8311	8433
6	7529	7561	6972	7002
7	3607	4103	3351	3775
8	61	61	52	52

П р и м е ч а н и е. Внешний диаметр верхнего основания конического змеевика – 0,33 м; внутренний диаметр труб теплообменных элементов – 20 мм; внутренний диаметр внешней трубы змеевика – 80 мм. Расход первичного теплоносителя – 11621 кг/ч; расход вторичного теплоносителя – 5852 кг/ч; температура водопроводной воды на входе в теплообменник 5°C . 1 – длина змеевика, м; 2 – высота змеевика, м; 3 – диаметр нижнего основания змеевика, м; 4 – количество витков; 5 – коэффициент теплоотдачи α_1 , Вт/ $^{\circ}\text{C}$; 6 – коэффициент теплоотдачи α_2 , Вт/ $^{\circ}\text{C}$; 7 – коэффициент теплопередачи K , Вт/ $^{\circ}\text{C}$; 8 – температура на выходе нагреваемого теплоносителя, $^{\circ}\text{C}$.

ный из прямых труб длиной 4 м, соединенных калачами, каждая секция которого насчитывает 20 теплообменных элементов из латунных труб диаметром 16 мм.

Для определения геометрических параметров змеевикового конического секционного теплообменника (по методике работы [12]) были проведены предварительные расчеты теплогидродинамических характеристик аппарата. Результаты приведены в табл. 2.

1. В ходе испытаний подтверждена производительность секционного змеевикового аппарата по горячей воде в объеме 5 м³/ч.

2. Установлено, что нагрузка за 5 сут на нагрев 67 м³ холодной водопроводной воды с начальной температурой 5 °C и температурой первичного теплоносителя 79 °C (что соответствует значению температуры на выходе из котельной в отопительный сезон при температуре наружного воздуха –10 °C) составила 17,8 Гкал. Температура воды на нужды горячего водоснабжения в доме укладывалась в нормативные значения 58–62 °C, что отвечает санитарно-гигиеническим требованиям и исключает опасность развития в трубопроводах горячего водоснабжения такого вредоносного микроорганизма, как лейционелла [14].

Если средняя температура горячего теплоносителя в отопительный сезон будет принята на уровне 95 °C, температура нагреваемого теплоносителя на выходе из аппарата составит 75–77 °C, что согласно СНиП 2.1.4.2496–09 соответствует нормативным требованиям.

Опыт эксплуатации существующего 3-секционного кожухотрубчатого теплообменника показал, что за исследуемый период на нагрев 67 м³ холодной воды (в интервале 58–62 °C) затрачено 20,06 Гкал тепла, что на 11,3 % превышает затраты тепла на нагрев холодной воды в опытном аппарате.

Таким образом, установка секционного змеевикового теплообменника позволит сэкономить 2,26 Гкал тепловой энергии на обогрев холодной воды, или в денежном выражении составит 3794,6 руб.

Заключение. Применение предлагаемой конструкции водоподогревателя повысит экономичность работы индивидуальных тепловых пунктов и будет способствовать снижению энергозатрат на эксплуатацию жилых зданий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барон В.Г. Теплообменным аппаратам ТТАИ – 25 лет // Новости теплоснабжения. 2017. № 4. С. 56–62.
2. Ахмерова Г.М. Проблемы перехода от ЦТП на АИТП в Казани // Новости теплоснабжения. 2016. № 5. С. 37–39.
3. Ливчак В.И. Установка ИТП в зданиях вместо замены изношенного оборудования в ЦТП и перекладки сетей горячего водоснабжения // Энергосбережение. 2008. № 1. С. 36–40.
4. Хасанов Г.М., Залилова А.Р., Ахмерова Г.М. Внедрение ИТП как вариант решения проблемы изношенности системы теплоснабжения // Тенденции развития науки и образования: сб. науч. тр. по материалам междунар. науч.-практич. конф. 30 июня 2017 г. Ч. 1. Самара: Изд-во НИЦ «Л-Журнал», 2017. С. 40–41.

5. Хромов Б.С. Экспертиза системы горячего водоснабжения в многоэтажном жилом здании // Сантехника. 2017. № 3. С. 12–20.
6. Ливчак В.И. Повышение энергоэффективности многоквартирных домов // Энергосбережение. 2010. № 6. С. 14–24.
7. Шилкин Н.В. Технико-экономическая оценка эффективности энергосберегающих мероприятий при проведении капитального ремонта многоквартирных домов // Энергосбережение. 2009. № 4. С. 20–26.
8. Барон В.Г. Расход воды в линии рециркуляции системы горячего водоснабжения требует уточнения // СОК. 2016. № 5.
9. Козин В.Е., Левина Т.А., Марков А.П. и др. Теплоснабжение: учебник для вузов. М.: Высш. шк., 1980. 408 с.
10. Барон В.Г. Легенды и мифы современной теплотехники или пластиначатые и кожухотрубные теплообменные аппараты // Новости теплоснабжения. 2004. № 8. С. 38–42.
11. Лыгин П.А. Новая конструкция кожухотрубных водо-водяных теплообменников // Новости теплоснабжения. 2004. № 11. <http://www.ntsn.ru>
12. Багутдинова А.Г., Золотоносов А.Д. Расчет и оценка эффективности змеевиковых теплообменников типа «труба в трубе» с изменяющимся радиусом изгиба винтовой спирали // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 1. С. 98–107.
13. Пат. РФ № 173387 на полезную модель МПК F28D7/02, 7/10. Секционный змеевиковый теплообменник / Я.Д. Золотоносов, А.Я. Золотоносов, Е.К. Вачагина. № 2016144790; заявл. 15.11.16; опубл. 24.08.17, Бюл. № 24.
14. Барон В.Г. О минимально необходимой температуре воды горячего водоснабжения // СОК. 2016. № 1. С. 26–28.

Мартынов Петр Олегович, асп.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Ахмерова Гузель Мневеровна, канд. пед. наук, доц.; E-mail: akhmerovaag@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Золотоносов Яков Давидович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: zolotonosov@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Багутдинова Альфия Гиззетдиновна, канд. техн. наук, доц.;

E-mail: bogoutdinova@rambler.ru

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Получено после доработки 20.08.18

Martynov Petr Olegovich, Post-graduate Student

Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Akhmerova Guzel' Mneverovna, PhD, Ass. Professor; E-mail: akhmerovaag@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Zolotonosov Yakov Davidovich, DSc, Professor; E-mail: zolotonosov@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Bogoutdinova Al'fiya Gizzetdinovna, PhD, Ass. Professor; E-mail: bogoutdinova@rambler.ru

Kazan (Privolzhsky) Federal University, Russia

EFFICIENCY AND PROSPECTS OF APPLICATION OF THE SECTIONAL COIL HEATER IN THE SYSTEM OF AN INDIVIDUAL HEAT POINT

Improving the methodology for selecting new ones and increasing the efficiency of existing individual heat points is an urgent task, the solution of which will improve the quality and reliability of the heat-engineering systems of buildings and the heat supply system as a

whole. The article considers the possibility of using a sectional coil heat exchanger in individual heat points in buildings. The obtained results can be used to increase the energy efficiency of individual heat points in buildings. Correct choice of schemes and qualitative selection of equipment will allow to minimize not only the costs of network water, the cost of consumed electric power, but also the costs of consumers.

Key words: energy saving, individual heat points, centralized heat supply, heat exchanger.

REFERENCES

1. Baron V.G. Teploobmennym apparatam TTAI – 25 let [Heat exchanger TTAI – 25 years]. Novosti teplosnabzheniya [Heat supply news]. 2017. No. 4. Pp. 56–62. (in Russian)
2. Akhmerova G.M. Problemy perekhoda ot TsTP na AITP v Kazani [Problems of transition from TSC to AITP in Kazan]. Novosti teplosnabzheniya [Heat supply news]. 2016. No. 5. Pp. 37–39. (in Russian)
3. Livchak V.I. Ustanovka ITP v zdaniyakh vместо замены iznoshennogo oborudovaniya v TsTP i perekladki setey goryachego vodosnabzheniya [Installation of ITP in buildings instead of replacing worn out equipment in the central heating substations and re-laying hot water networks]. Energosberezenie [Energy saving]. 2008. No. 1. Pp. 36–40. (in Russian)
4. Khasanov G.M., Zalyalova A.R., Akhmerova G.M. Vnedrenie ITP kak variant resheniya problemy iznoshennosti sistemy teplosnabzheniya [Implementation of ITP as an option to solve the problem of deterioration of the heat supply system]. Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya: sbornik nauchnykh trudov po materialam mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 30 iyunya 2017 g. [Trends in the development of science and education. Collection of scientific papers on the materials of the international scientific and practical conference on June 30, 2017]. P. 1. Samara: Publishing house Ed. Research Center «L-Magazine», 2017. Pp. 40–41. (in Russian)
5. Khronomov B.S. Ekspertiza sistemy goryachego vodosnabzheniya v mnogoetazhnom zhilom zdanii [Examination of the system of hot water supply in a multi-storey residential building]. Santechnika [Plumbing]. 2017. No. 3. Pp. 12–20. (in Russian)
6. Livchak V.I. Povyshenie energoeffektivnosti mnogokvartirnykh domov [Increase in energy efficiency of apartment buildings]. Energosberezenie [Energy saving]. 2010. No. 6. Pp. 14–24. (in Russian)
7. Shilkina N.V. Tekhniko-ekonomiceskaya otsenka effektivnosti energosberegayushchikh meropriyatiy pri provedenii kapital'nogo remonta mnogokvartirnykh domov [Technical and economic assessment of the efficiency of energy-saving measures during capital repairs of apartment buildings]. Energosberezenie [Energy saving]. 2009. No. 4. Pp. 20–26. (in Russian)
8. Baron V.G. Raskhod vody v linii retsirkulyatsii sistemy goryachego vodosnabzheniya trebuets utochneniya [Water consumption in the hot water supply system recycling line requires specification]. SOK [Plumbing, heating, conditioning]. 2016. No. 5. (in Russian)
9. Kozin V.E., Levin T.A., Markov A.P. and others. Teplosnabzhenie: uchebnik dlya vuzov [Heat supply: a textbook for universities]. Moscow, Higher school, 1980. 408 p. (in Russian)
10. Baron V.G. Legendy i mify sovremennoy teplotekhniki ili plastinchatye i kozhukhotrubnye teploobmennye apparaty [Legends and myths of modern heat engineering or plate and shell-and-tube heat exchangers]. Novosti teplosnabzheniya [News of heat supply]. 2004. No. 8. Pp. 38–42. (in Russian)

11. Lygin P.A. Novaya konstruktsiya kozhukhotrubnykh vodo-vodyanykh teploobmennikov [New design of skin-tube water-water heat exchangers]. Novosti teplosnabzheniya [Heat supply news]. 2004. No. 11. <http://www.ntsn.ru> (in Russian)
 12. Bagutdina A.G., Zolotonosov A.D. Raschet i otsenka effektivnosti zmeevikovykh teploobmennikov tipa «truba v trube» s izmenyayushchimysya radiusom izgiba vintovoy spirali [Calculation and evaluation of the efficiency of coil-type heat exchangers of the «Pipe-in-pipe» type with a variable bending radius of the screw helix]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 1. Pp. 98–107. (in Russian)
 13. Pat. RF No. 173387 na poleznuyu model' MPK F28D7/02, 7/10. Sektsionnyy zmeevikovyj teploobmennik [Patent of the Russian Federation No. 173387 for the utility model IPC F28D7 / 02, 7/10. Sectional coil heat exchanger]. Ya.D. Zolotonosov, A.Ya. Zolotonosov, E.K. Vachagina. No. 2016144790; claimed. 15.11.16; publ. 24.08.17, Bull. No. 24. (in Russian)
 14. Baron V.G. O minimal'no neobkhodimoy temperature vody goryachego vodosnabzheniya [On the minimum required temperature of hot water supply]. SOK [Plumbing, heating, conditioning]. 2016. No. 1. Pp. 26–28. (in Russian)
-

УДК 628.341:502.7

А.Н. МАХИНОВ, М.Н. ШЕВЦОВ, С.С. ГОЛОВКИН, А.Ф. МАХИНОВА,
С.Ю. ГОЛЯЧЕНКО

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОТСТОЙНИКОВ ГОРНО-ДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Рассмотрены основные негативные последствия для природной среды эксплуатации отстойников при разработке россыпных месторождений в северных районах РФ. Показано, что при консервации отстойников они продолжают оставаться объектами, представляющими опасность для загрязнения поверхностных вод. Приведены результаты многолетних исследований динамики качества воды и содержания тяжелых металлов донных отложений отстойников разного возраста. Предложены мероприятия по совершенствованию мониторинга состояния водных объектов и гидротехнических сооружений, проводимого с целью оценки состояния качества воды и обеспечения экологической безопасности при эксплуатации отстойников в суровых природных условиях.

Ключевые слова: отстойники, дамбы, эксплуатация месторождений, качество воды, донные отложения, экологическая безопасность, мониторинг.

DOI 10.32683/0536–1052–2018–717–9–75–82

Введение. В северных районах Хабаровского края начиная с 30-х гг. прошлого столетия разрабатывались сотни россыпных месторождений, существенно преобразовавших природные ландшафты во многих долинах рек [1]. Одними из наиболее специфических по воздействию на природную среду производственных объектов являются отстойники, которые нередко служат источниками загрязнения поверхностных вод взвешенными наносами и химическими веществами не только в процессе разработки месторождений, но и в течение длительного времени после окончания работ. Многие водотоки Хабаровского края в районах горно-добывающей деятельности характеризуются высокой загрязненностью [2]. Однако исследований многолетней динамики качества воды и донных отложений в отстойниках разного возраста и влияния на нее внешних факторов ранее на территории Дальнего Востока не проводилось [3].

Методика и материалы. Натурные исследования выполнялись в течение нескольких лет (2013–2017 гг.) в летний сезон года на одном из крупнейших россыпных месторождений Дальнего Востока, расположенном в долинах рек Кондер и Урголан [4, 5]. В этих водотоках и отстойниках пробы воды отбирались с поверхности. Для отбора проб выбирался чистый незаросший берег. Все пробы были отобраны в период низкого (меженного) уровня воды, характерного для рассматриваемой территории во второй половине июля – начале августа.

Отбор проб донных отложений в отстойниках производился в тех же точках, где отбирались пробы воды. С этой целью определялся участок, в пределах которого накапливались наименее тонкие фракции отложений –

© Махинов А.Н., Шевцов М.Н., Головкин С.С., Махинова А.Ф., Голяченко С.Ю., 2018

песчаные, песчано-илистые или илистые. Обычно такими участками являлись подводные или надводные отмели. Пробы отбирались из верхнего слоя отложений глубиной 0–10 см.

Анализы проб воды и донных отложений проводились в аккредитованной испытательной химической лаборатории сточной воды МУП г. Хабаровска «Водоканал» и Испытательной лаборатории по агрохимическому обслуживанию сельскохозяйственного производства ФГБУ центр агрохимической службы «Хабаровский».

Экологическая опасность отстойников горно-добывающих предприятий. Отстойники являются необходимым технологическим объектом при разработке россыпных месторождений полезных ископаемых и располагаются в наиболее пониженных участках, иногда на поймах рек или среди отвалов горных пород [6]. Они собирают не только пульпу действующих промприборов, но и поверхностный смыв с отвалов и нарушенных участков. В естественные водотоки вода из них сбрасывается через систему сопряженных отстойников.

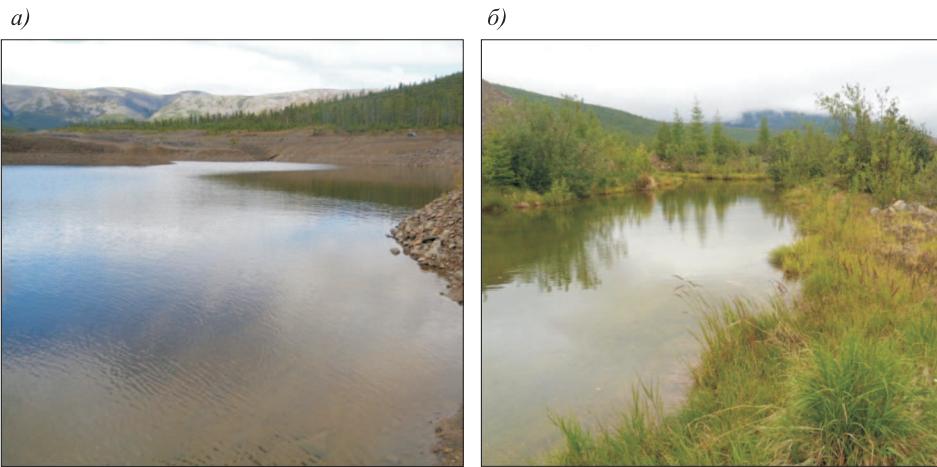
Нередко случаются внештатные ситуации, когда дамбы отстойников разрушаются, и это приводит к залповому сбросу воды с высокой мутностью в реки. Поэтому при их строительстве и эксплуатации необходимо учитывать природные факторы, способные нарушить целостность этих объектов [7]. Даже в условиях нормальной эксплуатации отстойники являются объектом повышенной опасности не только на действующих, но и ликвидированных или законсервированных предприятиях [8], поскольку вода в них характеризуется высокими показателями мутности, а дренаж из них постоянно загрязняет поверхностные водотоки.

Измеренная мутность воды в отстойниках разного возраста на полигонах месторождения Кондер приведена в табл. 1. В целом наблюдается общая закономерность: чем ранее законсервирован отстойник, тем меньше в нем мутность воды. Вместе с тем прозрачность воды в отстойниках существенно зависит от внешних факторов. Так, например, во время интенсивных ливней летом 2017 г. мутность воды в отстойниках заметно увеличилась, а поступление из них воды в р. Урголан привело к значительному превышению ПДК по мутности на участке ниже разрабатываемых полигонов в этом водотоке высшей рыбохозяйственной категории.

В качестве основных объектов исследования загрязнения воды химическими веществами были выбраны два отстойника (см. рисунок). Первый

Таблица 1. Измеренная мутность воды в отстойниках и р. Урголан, мг/дм³

Наименование водоема	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.
Отстойник 1998 г.	7,11	12,1	11,3	45,0
Отстойник 2003 г.	9,72	12,6	12,6	49,0
Отстойник 2009 г.	13,0	21,6	18,4	68,0
Действующий отстойник	—	889,0	—	1122,0
Река Урголан (выше района работ)	2,91	11,0	11,1	23,0
Река Урголан (ниже полигонов)	27,8	20,7	46,2	127,0



Стадии зарастания берегов отстойников в долине р. Кондер
а – отстойник 2009 г.; б – отстойник 1998 г.

ключевой участок расположен внутри кольцевого хребта Кондер в верхнем течении р. Кондер, в пределах которого разработка месторождения была прекращена в 1998 г. Второй участок – отстойник, сброс пульпы в который был прекращен в 2009 г.

Приведенные в табл. 2 и 3 данные химического состава вод отстойников показывают, что независимо от возраста гидротехнических сооружений в каждом из них в многолетнем режиме отмечается постепенное снижение показателей большинства компонентов, хотя мутность воды при этом изменяется в небольших пределах. Вместе с тем количественные показатели химических веществ по многим ингредиентам в отстойнике 2009 г. существенно выше по сравнению с отстойником 1998 г.

Таблица 2. Динамика показателей качества воды в отстойнике 2009 г.

Наименование показателя	Ед. изм.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.
pH	ед.	7,30	7,83	7,65	7,24	6,77
Фосфаты	мг/дм ³	–	–	0,06	0,07	0,10
Нитраты	мг/дм ³	1,84	0,54	0,24	0,11	0,67
Нитриты	мг/дм ³	0,04	0,02	<0,02	<0,02	0,024
Аммоний-ион	мг/дм ³	–	–	0,19	0,92	1,21
Нефтепродукты	мг/дм ³	0,12	0,10	0,013	0,011	0,03
Железо общ.	мг/дм ³	0,22	0,27	<0,05	0,92	2,02
Марганец	мг/дм ³	0,041	0,047	0,031	0,011	0,049
Кадмий	мг/дм ³	0,0019	0,00023	0,00017	0,0008	–
Медь	мг/дм ³	0,0084	0,0053	0,0014	0,0023	0,0083
Свинец	мг/дм ³	0,0019	0,0017	0,0022	0,0007	0,0013
Цинк	мг/дм ³	0,044	0,021	0,020	0,009	0,017

Таблица 3. Динамика показателей качества воды в отстойнике 1998 г.

Наименование показателя	Ед. изм.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.
pH	ед.	7,71	7,82	7,87	7,10	6,84
Фосфаты	мг/дм ³	—	—	0,14	0,09	<0,05
Нитраты	мг/дм ³	0,49	0,52	0,18	0,28	2,43
Нитриты	мг/дм ³	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,13
Аммоний-ион	мг/дм ³	—	—	0,49	0,25	0,40
Нефтепродукты	мг/дм ³	0,04	0,011	0,017	0,008	0,019
Железо общ.	мг/дм ³	1,31	1,12	0,02	0,012	2,35
Марганец	мг/дм ³	0,062	0,051	0,042	0,026	0,091
Кадмий	мг/дм ³	0,0005	0,0004	0,00005	0,00009	—
Медь	мг/дм ³	0,0076	0,0063	0,0038	0,0051	0,041
Свинец	мг/дм ³	0,0010	0,0008	0,0005	0,0006	0,0029
Цинк	мг/дм ³	0,031	0,017	0,009	0,005	0,041

Интенсивные ливни в июле 2017 г., вызвавшие высокие паводки в реках, обусловили значительный смыв загрязняющих веществ с нарушенных территорий в отстойники и повышенные содержания в их воде железа, нефтепродуктов, тяжелых металлов (медь, свинец, цинк). При этом для молодого отстойника характерно более существенное увеличение большинства показателей содержания химических веществ за этот год, что может быть связано с интенсивным ливневым смывом с поверхности, покрытой разреженной растительностью.

Отстойник 1998 г. по своим характеристикам фактически представляет собой озеро с заросшими берегами. Окружающая его территория, вследствие густой растительности, не способствует плоскостному смыву и поступлению в водоем загрязняющих веществ.

Вследствие низкого гипсометрического положения отстойников в долинах рек, водоприток в них значителен. Он в основном связан с поверхностным стоком, обусловленным таянием снегов в весенне время или интенсивными летними ливнями. Грунтовый водоприток осуществляется преимущественно в середине и конце лета во время таяния многолетнемерзлых пород. Опасность переполнения отстойников обуславливает необходимость сбрасывать в поверхностные водотоки загрязненные мелкодисперсным терригенным материалом воды.

Донные отложения водоемов более консервативны к загрязнению, поскольку накопление осадков в отстойниках происходит весьма медленно и в основном за счет смыва с прилегающей поверхности. Поэтому содержания основных компонентов близки к природному фону и незначительно изменяются во времени. Вместе с тем отмечаются более высокие концентрации нефтепродуктов, железа, марганца и тяжелых металлов в старом отстойнике по сравнению с созданным позднее (табл. 4). Повышение уровней воды в от-

Экологические последствия эксплуатации отстойников горно-добывающих предприятий

Таблица 4. Содержание основных химических компонентов в донных отложениях отстойников, мг/кг

Год	pH	Fe _{общ}	Mn	Cd	Zn	Cu	Pb	Hg	НП
<i>Отстойник 1998 г.</i>									
2013	7,14	3981	235	0,55	79,3	34,5	33,2	0,021	15,7
2014	7,01	3695	269	0,60	64,0	31,0	34,1	0,011	21,8
2015	7,05	4200	251	1,9	44,1	8,0	19,0	0,003	13,1
2016	7,11	3712	211	1,7	37,1	7,8	28,2	0,003	13,0
2017	7,15	3764	259	0,52	52,0	55,3	22,2	0,008	12,9
<i>Отстойник 2009 г.</i>									
2013	7,10	2929	195	1,3	29,0	15,6	4,8	–	8,8
2014	7,05	2100	100	2,0	21,0	11,0	2,0	–	7,1
2015	7,08	1900	100	2,0	45,0	7,0	3,1	0,004	3,9
2016	7,12	2300	121	1,6	31,0	11,0	3,1	0,003	3,9

Примечание. НП – нефтепродукты.

стойниках во время влажного лета 2017 г. практически не отразилось в изменении химического состава донных отложений.

Глубина отстойников в долинах рек Кондер и Уорголан небольшая и составляет обычно 2,0–5,0 м. Поэтому слабовыраженная циркуляция придонных вод незначительно влияет на геохимические процессы в донных отложениях [9], что обуславливает несущественные изменения во времени содержания в них химических элементов.

Меры по повышению экологической безопасности отстойников. Оценка качества воды и донных отложений в отстойниках месторождения Кондер, проводившаяся в течение 2013–2017 гг., позволила разработать предложения по снижению возможного негативного воздействия на поверхностные водотоки. Наиболее устойчивыми и, соответственно, безопасными являются отстойники, созданные в глубоких отработанных карьерах, частично врезанных в коренные породы. В течение 15–20 лет после отработки месторождения они превращаются в водоемы с заросшими берегами.

В отстойниках, сооруженных среди отвалов, вода долгое время остается мутной и составляет в среднем 15–20 мг/дм³. Одним из основных источников поступления взвешенных веществ в них являются ограждающие дамбы и окружающие отвалы. При интенсивных летних ливнях мутность воды во временных потоках, стекающих в отстойники, достигает 700 мг/л, а содержание взвешенных веществ в воде этих водоемов достигает 45–70 мг/дм³.

На откосах дамб создаются также условия для сползания обломков или целых относительно небольших блоков рыхлых пород в виде оползней-основов, что снижает устойчивость дамб, подвергая их опасности разрушения. Гораздо чаще и в общем суммарном объеме в большем количестве осуществляется смещение оттаявших грунтов в виде оплывин различного

размера. В начале весны случаются небольшие снежные лавины на высоких и крутых склонах дамб обвалования отстойников, что также способствует их разрушению. Основной задачей контроля состояния этих гидротехнических сооружений является регулярное наблюдение, при котором возможно обнаружение первых признаков опасных деформаций на склонах дамб.

Созданные в рыхлых отложениях отстойники должны периодически подвергаться профилактическому ремонту путем подсыпки размытых участков, укрепления откосов каменным материалом. В опасных для прорыва местах следует создавать необходимый запас грунта для быстрой ликвидации прорывов, а в периоды паводков организовывать дежурство землеройной техники. До периода наступления паводков канавы, соединяющие отстойники, необходимо очищать от наносов и ледяных «пробок» во избежание перелива вод через пониженные участки дамб.

Для оценки состояния отстойников предлагается расширить производственный экологический контроль территории, находящейся в пользовании предприятием. С этой целью следует организовать комплексные маршрутно-визуальные обследования состояния действующих гидротехнических сооружений два раза в течение теплого периода года, которые позволят выявить эрозионно-опасные участки, подверженные плоскостному смыву и линейному размыву поверхности дамб. На таких участках даже при незначительном размыве должны своевременно проводиться противоэрэозионные и противооползневые мероприятия. В тех случаях, когда данные непосредственных наблюдений показывают явные признаки особо интенсивной эрозии, организуется дополнительный мониторинг таких участков. Для укрепления дамб отстойников предлагается проводить отсыпку на их поверхности потенциально плодородной вскрышной породы, на которой быстро восстанавливаются растительность, закрепляющая склоны от разрушения.

Заключение. Отстойники являются основными объектами, негативно влияющими на окружающую среду при разработке россыпных месторождений [10]. При этом наибольшую опасность представляют созданные в толще рыхлых отложений отстойники в случае их аварийного разрушения. Более надежными являются подобные сооружения в отработанных карьерах, которые со временем преобразуются в устойчивые и длительно существующие озера.

С целью повышения устойчивости отстойников и предотвращения поступления из них загрязненных вод в поверхностные водотоки во время экстремальных климатических событий (интенсивные ливневые осадки, быстрое таяние снегов или многолетней мерзлоты) необходимо укрепление ограждающих дамб и обеспечение беспрепятственного перетока воды в системе отстойников и сброса ее в речную сеть. Также следует проводить специальную планировку поверхности склонов, обеспечивающую условия для более быстрого зарастания их древесной растительностью с целью повышения устойчивости дамб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воскресенский С.С., Сокольский А.М., Белая Н.И. Антропогенное преобразование долин на Дальнем Востоке СССР // Рельеф, климат и деятельность человека. М.: Наука, 1981. С. 98–105.

2. Погадаев Г.И. Химический состав поверхностных вод // Водные ресурсы Хабаровского края. Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 1990. С. 110–118.
3. Хе Кан Чеп. Исследование влияния хвостохранилищ на окружающую среду в горнорудных районах Дальневосточного региона // Математические заметки ЯГУ. 2001. Т. 8. Вып. 2. С. 147–156.
4. Корчевенков С.А. Разработка и обоснование эффективной технологии извлечения мелких частиц благородных металлов из россыпей (на примере месторождения Кондер): автореф. канд. дис. СПб., 2014. 28 с.
5. Sabry L.J., Lafamme J.H.G. Platinum group minerals from the Konder massif, Russian Far East // The Mineralogical Record. 1997. Vol. 28. P. 97–106.
6. Мирзает Г.Г. и др. Рациональное использование и охрана водных ресурсов при добыче и переработке полезных ископаемых: учеб. пособие. Л.: Изд-во ЛГИ, 1987. 87 с.
7. Махинов А.Н., Махинова А.Ф., Шевцов М.Н., Головкин С.С. Влияние разработки россыпных месторождений Приохотья на состояние водных объектов // Вестн. ТОГУ. 2014. № 3 (34). С. 103–112.
8. Шевцов М.Н., Махинов А.Н., Головкин С.С., Казарбина С.А. Экологический мониторинг водных ресурсов (на примере Хабаровского края). Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2017. 244 с.
9. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 2007. 321 с.
10. Янин Е.П. Экологическая геохимия горнопромышленных территорий. Обзор АО «ГеоИнформМарк». М., 1993. 287 с.

Махинов Алексей Николаевич, д-р геогр. наук, проф.; E-mail: amakhinov@mail.ru
Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

Шевцов Михаил Николаевич, д-р техн. наук; E-mail: shevtsov@mail.khstu.ru
Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

Головкин Сергей Сергеевич, асп.; E-mail: golovkin_09@mail.ru
Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

Махинова Александра Федоровна, канд. геогр. наук
Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

Голяченко Сергей Юрьевич, студ.
Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

Получено после доработки 15.08.18

Makhinov Aleksey Nikolaevich, DSc, Professor; E-mail: amakhinov@mail.ru
Pacific National University, Khabarovsk, Russia

Shevtsov Mikhail Nikolaevich, DSc; E-mail: shevtsov@mail.khstu.ru
Pacific National University, Khabarovsk, Russia

Golovkin Sergey Sergeevich, Post-graduate Student; E-mail: golovkin_09@mail.ru
Pacific National University, Khabarovsk, Russia

Makhinova Alexandra Fedorovna, PhD

Pacific National University, Khabarovsk, Russia

Golyachenko Sergey Yur'evich, Student

Pacific National University, Khabarovsk, Russia

ENVIRONMENTAL CONSEQUENCES OF THE EXPLOITATION HYDROTECHNICAL OBJECTS OF MINING ENTERPRISES

The main negative consequences for the natural environment of the operation of settling tanks in the development of placer deposits in the northern regions of the Khabarovsk Territory are considered. It is shown that during the conservation of septic tanks they

continue to be objects that pose a danger to pollution of surface waters. The results of long-term studies of the dynamics of water quality and the content of heavy metals in bottom sediments of septic tanks of different ages are presented. Measures are proposed to improve monitoring of the state of water bodies and hydraulic structures to assess the quality of water quality and ensure environmental safety during the operation of septic tanks in harsh natural conditions.

К e y w o r d s: sedimentation tanks, dams, field exploitation, water quality, bottom deposits, environmental safety, monitoring.

REFERENCES

1. V o s k r e s e n s k i y S.S. Antropogennoe preobrazovanie dolin na Dal'nem Vostoke SSSR [Anthropogenic transformation of valleys in the Far East of the USSR]. Rel'ef, klimat i deyatelnost' cheloveka [Relief, climate and human activity]. Moscow, Nauka, 1981. Pp. 98–105. (in Russian)
2. P o g a d a e v G.I. Khimicheskiy sostav poverkhnostnykh vod [The chemical composition of surface water]. Vodnye resursy Khabarovskogo kraya [Water resources of the Khabarovsk Territory]. Khabarovsk, Institute of Water and Environmental Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 1990. Pp. 110–119. (in Russian)
3. K h e K a n C h e r. Issledovanie vliyaniya khvostokhranilishch na okruzhayushchuyu sredu v gornorudnykh rayonakh Dal'nevostochnogo regiona [Study of the effect of tailings on the environment in the mining regions of the Far Eastern region]. Matematicheskie zametki Yakutskogo Gosudarstvennogo Universiteta [Mathematical notes of the Yakut State University]. 2001. No. 8. Issue. 2. Pp. 147–156. (in Russian)
4. K o r c h e v e n k o v S.A. Razrabotka i obosnovanie effektivnoy tekhnologii izvlecheniya melkikh chastits blagorodnykh metallov iz rossypey na primere mestorozhdeniya Konder: avtoref. dis. ... kand. geol. nauk [Development and substantiation of an effective technology for extracting fine particles of precious metals from placers (using the example of the Conder field): author. dis. ... PhD]. St. Petersburg, 2014. 28 p. (in Russian)
5. C a b r y L.J, L a f l a m m e J.H.G. Platinum group minerals from the Konder massif, Russian Far East. The Mineralogical Recor. 1997. Vol. 28. Pp. 97–106.
6. M i r z a e v G.G. and other. Ratsional'noe ispol'zovanie i okhrana vodnykh resursov pri dobyche i pererabotke poleznykh iskopaemykh: ucheb. posobie [Rational use and protection of water resources in the extraction and processing of mineral resources: studies allowance]. Leningrad, Publishing house of LGU, 1987. 87 p. (in Russian)
7. M a k h i n o v A.N., M a k h i n o v a A.F., S h e v t s o v M.N., G o l o v k i n S.S. Vliyanie razrabotki rossypnykh mestorozhdeniy Priokhot'ya na sostoyanie vodnykh ob'ektorov [Impact of alluvial mining Priokhotia on the state of water bodies]. Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of PNU]. 2014. No. 3 (34). Pp. 103–112. (in Russian)
8. S h e v t s o v M.N., M a k h i n o v A.N., G o l o v k i n S.S., K a z a r b i n a S.A. Ekologicheskiy monitoring vodnykh resursov (na primere Khabarovskogo kraya) [Environmental monitoring of water resources (on the example of the Khabarovsk Territory)]. Khabarovsk, Publishing house of PNU, 2017. 244 p. (in Russian)
9. G l a z o v s k a y a M.A. Geokhimiya prirodnnykh i tekhnogennykh landshaftov [Geochemistry of natural and man-made landscapes]. Moscow, Publishing house of MSU, 2007. 321 p. (in Russian)
10. Y a n i n E.P. Ekologicheskaya geokhimiya gornopromyshlennyykh territoriy. Obzor AO «Geoinformmark» [Ecological geochemistry of mining areas. Overview AO Geoinformmark]. Moscow, 1993. 287 p. (in Russian)

УДК 628.11

Е.Д. ХЕЦУРИАНИ, В.Л. БОНДАРЕНКО, Т.Е. ХЕЦУРИАНИ

**ОЦЕНКА ГЛАВЕНСТВУЮЩЕЙ РОЛИ
СИСТЕМНОЙ ЦЕЛОСТНОСТИ В ОБЕСПЕЧЕНИИ
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ЗОНАХ ВЛИЯНИЯ
ВОДОЗАБОРНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА**

Целью исследований явились водозаборные технологические комплексы в составе действующих природно-технических систем «Природная водная среда – водозаборно-технологический комплекс – система многоцелевого водоснабжения» в пространственных пределах бассейновых геосистем, где формируются количественные и качественные показатели водных ресурсов, используемых в системах питьевого водоснабжения городских хозяйств, промышленных объектов и ТЭС, ГРЭС, АЭС. На основе результатов исследований процессов взаимосвязи водозаборных технологических комплексов с природными средами для обеспечения экологической безопасности в зонах влияния была выявлена необходимость в оценке экологической приемлемости этих комплексов в целом и составляющих его отдельных конструктивных элементов, требований экологической безопасности [1]. Анализ результатов комплексных исследований по оценке функциональной и экологической эффективности ВТК в составе специализированного типа действующих ПТС «ПВС–ВТК–СМВ» определил необходимость оценки функциональной роли как отдельных конструктивных элементов, так и ВТК в целом в установленных зонах их влияния [2].

Ключевые слова: главенствующая функциональная роль, экологическая безопасность, водозаборный технологический комплекс, критерий экологической безопасности, биотические и абиотические факторы, функциональная роль.

DOI 10.32683/0536–1052–2018–717–9–83–90

Областью исследований является функциональная роль рассматриваемого отдельного конструктивного элемента техногенного компонента ВТК, действующего в составе ПТС «ПВС–ВТК–СМВ», во взаимодействии которого с ПВС водного объекта и СМВ городского хозяйства должна создаваться возможность сохранения естественного биоразнообразия ихтиофауны и флоры в водном объекте с обеспечением необходимых потребностей в питьевой воде городского хозяйства и систем технического водоснабжения промышленных предприятий, ТЭС, ГРЭС, АЭС расчетными расходами воды [3]. Исследования процессов взаимосвязи ВТК с природными (биотическими, абиотическими) компонентами в составе действующих в нижнем течении р. Дон (от Цимлянского водохранилища до устья при впадении в Азовское море) ПТС «ПВС–ВТК–СМВ» обусловливают собой по функциональной значимости иерархию показателей экологической безопасности по отдельным конструктивным элементам ВТК [4, 5]:

– водозаборное сооружение, обеспечивающее защиту водозаборного ковша от попадания молоди рыб, водной растительности, шуги и плавающих

предметов, взвешенных и донных наносов, поступающих из водного объекта при отборе расчетных расходов воды в СМВ;

– биопозитивные защитные конструкции водозаборного ковша от процессов возникновения и развития цианобактерий (синезеленых водорослей) как источников токсичного загрязнения воды, которая поступает из водозаборного ковша на очистные сооружения технологической системы водоподготовки для использования в СМВ городского хозяйства;

– комплекс защитных мероприятий водопроводящих трубопроводов технологической системы водоподготовки от негативного воздействия дрейсены на их пропускную способность;

– защита водозаборного сооружения от ледостава на водном объекте;

– показатель экологической безопасности ВТК по отношению к руслоформирующему процессам в зонах влияния на участке водного объекта.

В системном рассмотрении действующих ПТС «ПВС–ВТК–СМВ» в пространственных пределах бассейна (ППБ) геосистемы Нижнего Дона составляют часть ППБ р. Дон в целом. Они, в свою очередь, являются частью ППБ Азовского моря как части ПП Азово–Черноморского бассейна в глобальной системе биосфера Земли. Их зоны влияния занимают низший иерархический уровень, который зависит от систем более высоких иерархических уровней [4, 6]. Такая системная взаимосвязь иерархических уровней ППБ до биосферы Земли, в пределах которой формируется глобальный влагооборот под воздействием непрерывных потоков солнечной энергии, обуславливает собой методологию оценки главенствующей роли конструктивных элементов ВТК по обеспечению экологической безопасности в составе ПТС «ПВС–ВТК–СМВ» [1, 5].

Основным условием целенаправленного и устойчивого функционирования специализированного типа ПТС «ПВС–ВТК–СМВ» является системная взаимосвязь геосистемы Нижнего Дона с геосистемой более высокого иерархического уровня, в данном случае Азовского моря.

Анализ действующих ВТК (более 40) в ППБ геосистемы Нижнего Дона, где наблюдается устойчивая тенденция роста объемов водопотребления СМВ городских хозяйств, населенными пунктами, промышленными объектами, ГРЭС, АЭС, показывает, что специализированный тип ПТС «ПВС–ВТК–СМВ» в системном понимании представляет собой определенную упорядоченность в процессах взаимосвязи между ПВС, ВТК и СМВ. Упорядоченность обусловливает собой процессы самоорганизации между ПВС водного объекта, действующими ВТК и СМВ при условии обеспечения необходимого комплекса эффективных защитных мероприятий на действующих ВТК, которые отмечены выше.

Управление процессами взаимосвязи между техногенным компонентом ВТК и окружающей его ППБ геосистемы водного объекта в системном понимании осуществляется в соответствии с главным принципом системной целостности. Он определяет собой главенствующую роль целого над частями – компонентами рассматриваемой ПТС «ПВС–ВТК–СМВ» в виде ПВС, ВТК и СМВ, которые включают в себя составляющие их элементы. Так, в природном компоненте ПВС существует разнообразие молоди рыб, перемещающейся в водном потоке, взвешенные и донные наносы, водные микро-

организмы, растительность и т.п.; в техногенном компоненте ВТК – водозаборное гидротехническое сооружение, биопозитивные защитные устройства от синезеленых водорослей, ледозащитные конструкции и др.; в технологическом комплексе водоподготовки – защитные устройства от дрейссены и др. [7]. Главенствующий принцип системной целостности, как показывают результаты исследований, определяется неотъемлемой системной взаимосвязью компонентов действующей ПТС «ПВС–ВТК–СМВ» с ППБ геосистемы водного объекта, где формируются водные ресурсы. Они, в свою очередь, взаимосвязаны с ППБ геосистемы более высоких иерархических уровней, в которых формируются гидрологические процессы для рассматриваемых ППБ геосистемы водного объекта. На уровне зон влияния ВТК в составе ПТС «ПВС–ВТК–СМВ» принцип системной целостности и функциональной эффективности определяется для ВТК, в котором взаимосвязанно действуют конструктивные элементы как между собой, так и компонентами ПВС и СМВ системы [1, 4].

Взаимосвязь природных процессов по формированию количественных и качественных показателей водного стока (поверхностного, подземного) в рассматриваемых ППБ геосистемы под воздействием гидрологических процессов ППБ геосистем более высоких иерархических уровней определяет природную составляющую принципа главенствующей роли целого над природным компонентом ПВС водного объекта и соответственно над техногенными компонентами ВТК и СМВ, определяющими собой техногенные составляющие главенствующей роли целого в рассматриваемых ПТС «ПВС–ВТК–СМВ».

Техногенная составляющая главенствующей роли целого определяется уровнем функциональной эффективности и конструктивным совершенством элементов ВТК и защитных устройств от дрейссены в технологических трубопроводах системы водоподготовки СМВ.

Природная составляющая принципа главенствующей роли целого в рассматриваемом типе ПТС «ПВС–ВТК–СМВ» изначально формируется глобальными процессами влагооборота в пространственных пределах биосфера Земли и по иерархической системной взаимосвязи достигает уровня локальных бассейновых геосистем, в рассматриваемом случае нижнего течения р. Дон, в пределах которого действует порядка 40 шт. ПТС «ПВС–ВТК–СМВ». Следует отметить, что глобальный влагооборот как производная динамики климата Земли определяется гидрологическими процессами в пределах биосферы Земли, на протекание которых расходуется до 20 % солнечной энергии, достигающей земной поверхности суши и Мирового океана, а на процессы фотосинтеза растительного мира Земли менее 1 % [8–10]. На примере Александровского ВТК СМВ городов Ростова-на-Дону, Аксая, Батайска, расположенного на 100 км от устья р. Дон в г. Аксай, главенствующая роль целого природной составляющей проявляется в виде руслового расхода (Q , м³/с) в створе водоотбора и соответственно уровенного режима на водном объекте, от которых зависит функциональная устойчивость отбора расчетных расходов воды в СМВ. Следует отметить, что количественные и качественные показатели расчетного стока, формируемые в ППБ геосистемы Нижнего Дона, определяют про-

цессы жизнедеятельности ихтиофауны, микроорганизмов, водной растительности на гидрографической речной сети, а также русловые процессы, связанные с транспортированием донных и взвешенных наносов и руслоформированием.

Техногенная составляющая принципа главенствующей роли целого, неотъемлемо взаимосвязанной с природной составляющей главенствующей роли целого, по полученным данным исследований проявляется в процессе взаимосвязи между собой конструктивных элементов ВТК и непосредственно ПВС водного объекта с водозаборным гидротехническим сооружением. В целенаправленном функционировании ВТК в составе ПТС «ПВС–ВТК–СМВ» техногенная составляющая принципа главенствующей роли целого является последующим системным звеном практического использования водных ресурсов в СМВ, что важно учитывать при принятии проектных решений [1].

Для ВТК в составе специализированного типа ПТС «ПВС–ВТК–СМВ» его функциональная (отбор расчетных расходов воды, сохранение биоразнообразия ихтиофауны и водной растительности, защита водозаборного ковша от донных взвешенных наносов, защита водозаборного сооружения от ледостава и др.) и конструктивная зависимости от главенствующей роли целого определяются экологической приемлемостью, представляющей собой своеобразные природные (функциональные, конструктивные) «копии» в процессах взаимосвязи элементов техногенного компонента ВТК с природным компонентом ПВС водного объекта. Экологическая приемлемость элементов ВТК выражается конструктивным совершенством, функциональной устойчивостью при различных режимах работы конструктивных элементов ВТК в составе «ПВС–ВТК–СМВ», а в системном механизме – обеспечением максимально возможного сохранения естественного биоразнообразия и руслового гидравлического режима на водном объекте и изменением экологического состояния водной среды в водозаборном ковше путем удаления синезеленых водорослей и дрейссены, что будет способствовать выполнению главенствующей роли целостности в техногенной составляющей.

В развитии понятия техногенной составляющей принципа главенствующей роли целого экологическая приемлемость ВТК в составе действующих и создаваемых ПТС «ПВС–ВТК–СМВ» на основе результатов многолетних исследований может характеризоваться рядом концептуальных утверждений [6, 11, 12].

1. Экологическая приемлемость водозаборного гидротехнического сооружения определяется конструктивным совершенством, которое всецело зависит от используемых конструкционных материалов, характера взаимосвязи с ПВС водного объекта при различных режимах функционирования водозаборного гидротехнического сооружения в составе ВТК.

2. Экологическая приемлемость водозаборного гидротехнического сооружения в составе ВТК определяется процессами взаимосвязи с ПВС водного объекта по сохранению естественного биоразнообразия (молоди рыб и др.) при различных режимах водоотбора.

3. Экологическая приемлемость ВТК определяется ресурсоемкостью, энергоэффективностью в технологических процессах строительства и эксплуатации.

4. Доминирующим показателем в причинно-следственной логике взаимосвязи конструктивных элементов ВТК и ПВС водного объекта и водной средой водозаборного ковша является формируемое экологическое состояние, определяющее экологическую безопасность.

5. Экологическая приемлемость конструктивных элементов в составе ВТК способствует доминированию естественных процессов преобразований в ПВС водного объекта по сохранению биоразнообразия и соответственно снижению темпов роста уровня энтропии.

6. Экологическая приемлемость конструктивных элементов в составе ВТК определяется функциональными количественными и качественными показателями, к примеру, уровнем защиты (до 85 %) молоди рыб при отборе расчетных расходов воды из водного объекта в водозаборный ковш.

ВТК в составе специализированного типа ПТС «ПВС–ВТК–СМВ» является центральным техногенным компонентом, замыкающим на себе в зонах влияния определенную часть ППБ геосистемы Нижнего Дона, где формируются количественные и качественные показатели руслового водного потока, которые оказывают влияние непосредственно на процессы жизнедеятельности речной ихтиофауны и водной растительности.

Выводы. На основе результатов исследований процессов взаимосвязи ВТК в составе ПТС «ПВС–ВТК–СМВ» определены природные и техногенные составляющие принципа главенствующей роли системной целостности. Эти составляющие непосредственно оказывают влияние на формирование экологического состояния в зонах влияния ВТК городских хозяйств как доминирующего фактора по обеспечению экологической безопасности и, в частности, по обеспечению биологического разнообразия водного объекта.

Перечень условных обозначений:

ВТК – водозаборные технологические комплексы

ПВС – природная водная среда

ПП – пространственные пределы

ППБ – пространственные пределы бассейна

ПТС – природно-технические системы

СМВ – система многоцелевого водоснабжения

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бондаренко В.Л., Скибин Г.М., Азаров В.Н., Семенова Е.А., Приваленко В.В. Экологическая безопасность в природообустройстве, водопользовании и строительстве: оценка экологического состояния бассейновых геосистем: монография. Новочеркасск, 2016. 416 с.
2. Бондаренко В.Л., Семенова Е.А., Алферов А.В., Клименко О.В. Природно-технические системы в использовании водных ресурсов: территории бассейновых геосистем: монография. Новочеркасск, 2016. 204 с.
3. Природообустройство: территории бассейновых геосистем: учеб. пособие / под ред. И.С. Румянцева. Ростов н/Д: Изд. центр «МарТ», 2010. 528 с.

4. Волосухин В.А., Бондаренко В.Л. Основы методологии системного анализа природно-технических систем по использованию водных ресурсов // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2015. № 5. С. 15–24.
5. Речные бассейны / под ред. А.М. Черняева. Екатеринбург: АгроЭкология, 1999. 356 с.
6. Бондаренко В.Л. и др. Экологическая безопасность в строительстве. Инженерно-экологические изыскания в комплексе изысканий под строительство водохозяйственных объектов. Новочеркасск, 2016. 309 с.
7. Вдовин Ю.И., Лушкин И.А., Халиков Р.К., Хецуриани Е.Д. Водозаборы из поверхностных источников: состояние, проблемы, тенденции совершенствования // Вестн. СГАСУ. Строительство и архитектура. 2011. Вып. 2. С. 55–61.
8. Гед Р. Дэйвис. Энергия для планеты Земля // В мире науки. 1990. № 11. С. 7–16.
9. Ковальчук М.В. От синтеза в науке – к конвергенции в образовании // Образовательная политика. 2010. № 11-12 (49-50). С. 1–12.
10. Ковальчук М.В., Нарайкин О.С. Конструктор для будущего // В мире науки. 2011. № 9. С. 24–31.
11. Saling P., Kicherer A., Dittrich-Kramer B., Wittlinger R., Zombik W., Schmidt I., Schrott W., Schmidt S. Life Cycle Management. Eco-efficiency Analysis by BASF: The Method. BASF. 2002. Pp. 42–57.
12. Saling P., Hofer R. «Metrics for Sustainability» as part of RSC Green Chemistry. No. 4; Sustainable Solutions for Modern Economies. Ed. by Rainer Hufer; The Royal Society of Chemistry; «Green Chemistry Series». Eds. J. Clark, University of York; G. Kraus, Iowa State University. 2009. P. 25–37.

Хецуриани Елгуджа Демурович, канд. техн. наук, проф.; E-mail: goodga@mail.ru
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону

Бондаренко Владимир Леонидович, д-р техн. наук, проф.
Донской государственный аграрный университет, г. Новочеркасск

Хецуриани Тимур Елгуджаевич, студ.
Ростовский государственный медицинский университет

Получено после доработки 13.08.18

Khetsuriani Elgudzha Demurovich, PhD, Professor; E-mail: goodga@mail.ru
South-Russian State Polytechnic University (NPI) M.I. Platova, Novocherkassk, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia
Bondarenko Vladimir Leonidovich, DSc, Professor
Don State Agrarian University, Novocherkassk, Russia
Khetsuriani Timur Elgudzhaevich, Student
Rostov State Medical University, Russia

ASSESSMENT'S PRIMARY ROLE IN ENSURING ENVIRONMENTAL SECURITY IN THE ZONES OF INFLUENCE OF WATER INTAKE TECHNOLOGY COMPLEX MULTI-PURPOSE SYSTEMS OF WATER SUPPLY OF URBAN

The purpose of researches were water intaking technological complexes as a part of the operating natural and technical systems «The Natural Water Environment – a Water Intaking Technological Complex – the System of Multi-purpose Water Supply» in spatial limits of basin geosystems where quantitative and quality indicators of the water

resources used in the systems of drinking water supply of municipal economies, industrial facilities and thermal power plant, state district power plant, the NPP are formed. On the basis of results of researches of processes of interrelation of water intaking technological complexes with environments for ensuring environmental safety in zones of influence need for assessment of the ecological acceptability of these complexes in general and the separate structural elements making it, requirements of environmental safety was revealed [1]. The analysis of results of complex researches on assessment of functional and environmental efficiency of WTC as a part of specialized type of the operating NTS «NWE–WTC–SMW» defined need of assessment of a functional role both separate structural elements, and WTC in general in the established zones of their influence [2].

К e y w o r d s: dominant functional role, ecological safety, water intake technological complex, criterion of ecological safety, biotic and abiotic factors, functional role.

REFERENCES

1. Bondarenko V.L., Skibin G.M., Azarov V.N., Semenova E.A., Privalenko V.V. *Ekologicheskaya bezopasnost' v prirodoobustroystve, vodopol'zovanii i stroitel'stve: otsenka ekologicheskogo sostoyaniya basseynovykh geosistem: monografiya* [Environmental security in the environmental engineering, water management and construction: assessment of the ecological state of basin geosystems: monograph]. Novocherkassk, 2016. 416 p. (in Russian)
2. Bondarenko V.L., Semenova E.A., Alferov A.V., Klimenko O.V. *Prirodno-tehnicheskie sistemy v ispol'zovanii vodnykh resursov: territorii basseynovykh geosistem: monografiya* [Natural-technical system in the use of water resources: the territory of the basin geosystems: monograph]. Novocherkassk, 2016. 204 p. (in Russian)
3. Prirodoobustroystvo: territorii basseynovykh geosistem: uchebnoe posobie [Environmental engineering: areas of basin geosystems: study guide]. Ed. by I.S. Rumyantsev. Rostov-on-Don, Publishing center «MarT», 2010. 528 p. (in Russian)
4. Volosukhin V.A., Bondarenko V.L. *Osnovy metodologii sistemnogo analiza prirodno-tehnicheskikh sistem po ispol'zovaniyu vodnykh resursov* [Bases of methodology of the system analysis of natural and technical systems on use of water resources]. Ispol'zovanie i okhrana prirodykh resursov v Rossii [Use and protection of natural resources in Russia]. 2015. No. 5. Pp. 15–24 (in Russian)
5. Rechnye basseyny [River basins]. Ed. A.M. Chernyaev. Ekaterinburg, Agroecology, 1999. 356 p. (in Russian)
6. Bondarenko V.L. et al. *Ekologicheskaya bezopasnost' v stroitel'stve. Inzheenerno-ekologicheskie izyskaniya v kompleksye izyskaniy pod stroitel'stvo vodo-khozyaystvennykh ob'yektov* [Environmental safety in construction. Engineering and environmental surveys in the complex of surveys for the construction of water facilities]. Novocherkassk, 2016. 309 p. (in Russian)
7. Dovin Yu.I., Lushkin I.A., Khalikov R.K., Khetsuriani E.D. *Vodozabory iz poverkhnostnykh istochnikov: sostoyanie, problemy, tendentsii soverchenstvovaniya* [Intakes from surface sources: state, problems, tendencies of improvement]. Vestnik SGASU. Stroitel'stvo i arkhitektura [Herald of SSUABCE. Construction and architecture]. 2011. Issue 2. Pp. 55–61. (in Russian)
8. Ged R. Davis. *Energiya dlya planety Zemlya* [Energy for planet Earth]. V mire nauki [In the world of science (Scientific American)]. 1990. No. 11. Pp. 7–16. (in Russian)

9. Koval'chuk M.V. Ot sinteza v naуke – k konvergentsii v obrazovanii [From synthesis in science-to convergence in education]. Obrazovatel'naya politika [Educational policy]. 2010. No. 11-12 (49-50). Pp. 1–12. (in Russian)
 10. Koval'chuk M.V., Naraykin O.S. Konstruktor dlya budushchego [Designer for the future]. V mire nauki [In the world of science]. 2011. No. 9. Pp. 24–31. (in Russian)
 11. Saling P., Kicherer A., Dittrich-Kramer B., Wittlinger R., Zombik W., Schmidt I., Schrott W., Schmidt S. Life Cycle Management. Eco-efficiency Analysis by BASF: the Method. BASF. 2002. Pp. 42–57.
 12. Saling P., Hofer R. «Metrics for Sustainability» as part of the RSC Green Chemistry. No. 4; Sustainable Solutions for Modern Economies. Ed. by Rainer Hufer; the Royal Society of Chemistry; «Green Chemistry Series». Eds. J. Clark, University of York; G. Kraus, Iowa State University. 2009. Pp. 25–37.
-

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА



УДК 693.547.3

И.М. СЕБЕЛЕВ, Э. ДУГЭРСУРЭН, М.М. ТИТОВ, Н.П. КАРАСЁВ

КИНЕТИКА ПРОЧНОСТИ БЕТОНА НА РОССИЙСКИХ И МОНГОЛЬСКИХ ЦЕМЕНТАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ТВЕРДЕНИЯ

Изучена кинетика нарастания прочности бетона на сжатие на цементах российского и монгольского производства с добавками СП-3 и Pantarhit при различных температурах твердения. Определены оптимальные температура и срок твердения монолитного бетона при прогреве, когда обеспечивается достижение требуемой прочности бетона в промежуточном возрасте и в последующем проектной прочности. Обосновано увеличение расхода цемента в прогреваемом бетоне по отношению к количеству цемента в бетоне, твердеющему в нормальных условиях. Увеличение расхода цемента зависит от требуемой величины прочности бетона в промежуточном возрасте (% от R_{28}).

Ключевые слова: зимнее бетонирование, прочность на сжатие, цемент, расход цемента, добавки, Монголия.

DOI 10.32683/0536–1052–2018–717–9–91–100

Одним из важных этапов строительных работ является зимнее бетонирование, которое имеет свои особенности и осуществляется с использованием современных методов. В России и мировой практике разрабатываются и применяются новые способы бетонирования, используются инновационные материалы, которые обеспечивают получение в условиях строительной площадки бетонов с заданными физико-механическими эксплуатационными характеристиками, существенно не отличающимися от свойств бетона, твердеющего в нормальных условиях. Естественно, что затраты на строительство в зимнее время года несколько выше, нежели в летний период, а проведение работ связано с различного рода проблемами и сложностями.

В «Руководстве по производству бетонных работ в зимних условиях, районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера», разработанного НИИЖБ и наиболее распространенного в среде научных работников и строителей инструктивного документа, «приведены результаты научных исследований, конструкторских разработок и передового производственного опыта»

© Себелев И.М., Дугэрсурэн Э., Титов М.М., Карасёв Н.П., 2018

на момент его опубликования – 1982 г. В данном Руководстве указано, что при необходимости получения в установленный срок проектной прочности бетона рекомендуется увеличить марку бетона против проектной на одну ступень, так как нужно учитывать, что «бетоны, подвергнутые электротермообработке при жестких режимах, недостаточной защите от влагопотерь, отсутствии добавок и т.п., к 28-суточному возрасту после прогрева могут иметь недобор прочности до 10 % R_{28} » [п. 2.3].

Достаточно ли сегодня согласно данной рекомендации увеличить класс бетона, например, с В22,5 до В25 (с М300 до М350) для того, чтобы была обеспечена 70–80–90%-ная разопалубочная прочность (прочность бетона в промежуточном возрасте согласно ГОСТ 18105 – 2010) в проектном возрасте на различных цементах при различных режимах электрообогрева? Однозначно ответить невозможно.

С момента опубликования Руководства изменились не только виды и качественные характеристики цементов, но и методы их испытаний, появились высокоэффективные пластифицирующие и противоморозные добавки, усовершенствовались технологии бетонных работ, методы контроля и оценки прочности бетона, что в совокупности привело к необходимости уточнения некоторых положений данного Руководства.

В Монголии, например, в настоящее время достаточно хорошо изучено влияние повышения температуры на интенсификацию твердения бетона на местных цементах для тепловлажностной обработки, но эти данные невозможно перенести на бетоны, прогреваемые электрическим током, так как последние находятся в совершенно иных, по сравнению с пропариванием, условиях.

Цель работы. Определить рациональную температуру и минимальный период изотермического обогрева бетона на различных цементах для получения требуемой разопалубочной прочности (прочности бетона в промежуточном возрасте в соответствии с ГОСТ 18105–2010). Исследования производились на цементах Искитимского (Россия) и Хутульского (Монголия) заводов.

В строительном производстве, как правило, используются различные технологии зимнего бетонирования, каждая из которых имеет несколько модификаций [1].

Конфигурация и размеры конструкции, характер армирования, наличие электрических мощностей и имеющееся на строительной площадке оборудование влияют на выбор того или иного способа электротермообработки бетона. Наиболее часто в настоящее время используется электрообогрев бетона греющими токоизолированными проводами за счет его сравнительно неплохой теплопроводности: $\lambda = 1,6 \div 2,2 \text{ Вт}/\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$ [2].

Существует множество факторов, влияющих на скорость твердения бетона, следовательно, на прочность и качество бетона: химико-минералогический состав цемента, его активность и удельная поверхность, вещественный состав бетонной смеси и водоцементное отношение, зерновой состав и качество заполнителей, вид, качество и количество добавок, качество перемешивания и степень уплотнения, возраст и условия твердения бетона [3–6].

Таблица 1. Экспериментальные данные определения качества цемента

№	Определяемые характеристики	Значение	
		хутульский OPC 42,5	исkitимский ПЦ 400Д20
1	Нормальная густота, %	27,2	26,0
2	Сроки схватывания, ч/мин начало	02–55	2–30
	конец	03–30	4–40
3	Равномерность изменения объема: в воде	Без изменений	
	над паром		
4	Тонкость помола/остаток на сите 008, %	1,0	8,2
5	Удельная поверхность, м ² /кг	394	338
6	Прочность при изгибе в возрасте 28 сут, МПа	6,5	7,1
7	Прочность при сжатии в возрасте 28 сут, МПа	42,5	43,0

В практике строительства в последние годы при изготовлении бетонов применяются высокоэффективные суперпластификаторы на поликарбоксилатной основе (гиперпластификаторы), механизм действия которых основан на взаимосвязи пространственного и электростатического эффектов [7], а пластифицирующая способность в значительной степени зависит от величины содержания в цементе свободных щелочей, природы сульфата кальция, температуры бетонной смеси, скорости и продолжительности перемешивания [8–12].

Прочность бетона зависит не только от количества и качества исходных материалов, но и в значительной мере определяется рядом производственных факторов: точностью дозирования компонентов, условиями перемешивания и уплотнения бетонной смеси, способами ее транспортирования.

Режим электропрогрева назначается с учетом длительности изотермического прогрева, который зависит от вида и качества применяемого цемента, массивности конструкций, температуры прогрева, требуемой разопалубочной прочности бетона, возможности набора прочности за время остывания прогретых конструкций.

Необходимо отметить, что при повышении температуры сохраняются основные закономерности протекания химического взаимодействия клинкерных минералов с водой, но механизм и состав образующихся продуктов качественно не изменяется [13, 14].

Материалы и методы (табл. 1, 2). Как видно из сравнения данных, в химико-минералогическом составе цементов имеются различия, кото-

Таблица 2. Химико-минералогический состав монгольского (Хутульский завод) и российского (Искитимский завод) цементов

Основной минерал	Содержание, %	
	хутульский OPC 42,5	исkitимский ПЦ 400Д20
C3 S	54,2	59,0
C2 S	25,0	16,9
C3 A	9,4	7,3
C4 AF	11,0	14,6

рые при электропрогреве могут сказаться на поведении цемента и бетона на его основе.

Возраст хутульского цемента на момент начала проведения эксперимента составлял 7 месяцев.

Состав бетонной смеси, кг/м³ (производственные составы): искитимский цемент – 346; песок – 782; щебень – 1100; вода – 185; добавка Pantarhit – 0,6 % от массы цемента. Хутульский цемент – 290; щебень – 1100; песок – 835; вода – 195; добавка (СП-3) – 0,5 % от массы цемента.

Из одного замеса готовили стандартные образцы-кубы по четыре на каждый срок испытания (3, 7, 28 сут) для различной температуры:

– одна серия образцов хранилась 28 сут в нормальных условиях: при температуре 20 ± 2 °C и относительной влажности воздуха $95 \pm 5\%$ (контрольный состав);

– одна серия: 2 ч выдержка образцов, 3 ч – изотермический подъем до необходимой температуры 40 ± 1 °C, далее до 3 сут при температуре 40 ± 1 °C, затем в нормальных условиях до 28 сут (основной состав № 1);

– одна серия: 2 ч выдержка образцов, 5 ч – изотермический подъем до необходимой температуры 60 ± 1 °C, далее до 3 суток при температуре 60 ± 1 °C, затем в нормальных условиях до 28 сут (основной состав № 2).

Перед испытанием на прочность «горячие» образцы выдерживали 2 ч в нормальных условиях.

Эксперимент проводился трижды. В табл. 1, 2 представлены средние значения результатов эксперимента.

Среднее квадратическое отклонение 1,5 МПа.

Результаты испытаний и их обсуждение. Анализ приведенных в табл. 3, 4 результатов исследований показывает:

1. Увеличение изотермической температуры прогрева в первые трое суток с температуры 20 ± 2 °C до $+40$ и 60 ± 1 °C способствует интенсификации твердения бетона на ранней стадии (первые трое суток) на 62–65 % на искитимском цементе и на 46–49 % на хутульском цементе, что позволяет обеспечить высокие темпы строительно-монтажных работ.

2. Прогрев бетонной смеси при температуре 40 и 60 ± 1 °C в течение 3 сут позволяет получить прочность бетона на сжатие соответственно не ниже 70 % на искитимском цементе и 50 % на хутульском цементе от требуемой 28-суточной.

Таблица 3. Результаты тепловой обработки бетона с добавкой Pantarhit на искитимском цементе

№ п/п	Температура тепловой обработки, °C	Прочность бетона при сжатии (МПа) в возрасте, сут		
		1	3	28
1	Нормальные условия 20 ± 2	6,8	21,2	35,4
2	40 ± 1	18,0	31,2	44,6
3	60 ± 1	19,3	23,5	32,9

Таблица 4. Результаты тепловой обработки бетона с добавкой СП-3 на хутульском цементе

№ п/п	Температура тепловой обработки, °C	Прочность бетона при сжатии (МПа) в возрасте, сут		
		1	3	28
1	Нормальные условия 20 ± 2	4,4	13,0	25,9
2	40 ± 1	12,1	19,2	22,3
3	60 ± 1	16,1	19,1	21,7

3. Увеличение изотермической температуры прогрева бетонной смеси с 40 до 60 ± 1 $^{\circ}\text{C}$ нерационально, так как прочность на сжатие твердевшего при температуре 60 ± 1 $^{\circ}\text{C}$ бетона (основной состав № 2) в возрасте 3 и 28 сут не только не выше, но даже ниже прочности бетона, твердевшего при температуре $+40 \pm 1$ $^{\circ}\text{C}$ (основной состав № 1), а расход энергии при этом, естественно, существенно выше.

4. Прочность бетона контрольного состава на искитимском цементе в возрасте 1 и 3 сут ниже прочности основного состава № 1 соответственно на 62 и 32 %, а в возрасте 28 сут – выше на 7 %; прочность бетона контрольного состава на хутульском в возрасте 1 и 3 сут ниже прочности основного состава № 1 соответственно на 51 и 16 %, а в возрасте 28 сут – выше на 18 %.

5. Для достижения бетоном основного состава № 1 в возрасте 28 сут прочности, равной бетону контрольного состава, необходимо увеличить расход цемента основного состава на 7–9 %.

6. Интенсивность нарастания прочности бетона при $T = 40$ $^{\circ}\text{C}$ на гиперпластификаторах значительно выше, чем на традиционных суперпластификаторах типа С-3.

7. Режим тепловой обработки влияет на изменение предельно достигаемой прочности на сжатие бетона в зависимости от вида применяемого цемента и основы пластифицирующей добавки.

СНиП 82-02-95 «Федеральные (типовые) элементные нормы расхода цемента при изготовлении бетонных и железобетонных изделий и конструкций» разработан для тяжелых, мелкозернистых и легких бетонов, применяемых во всех видах строительства.

«В типовых элементных нормах впервые установлены и дифференцированы минимальные расходы различных видов цементов, рассчитанные из условий обеспечения долговечности изделий и конструкций при различных условиях их эксплуатации, а также сняты необоснованные запреты и ограничения (на максимальный расход цемента, изменения режимов тепловой обработки, обязательное применение определенных видов и марок цемента, добавок и т.д.)».

В п. 4.3 указано, что «ТЭН регламентируют содержание цемента в 1 m^3 бетона изделий и конструкций (в плотном теле), обеспечивающее ему заданные свойства (класс прочности на сжатие, марки по плотности, морозостойкости, водонепроницаемости), предусмотренные проектной документацией при применении технологических приемов и режимов производства, а также цементов и заполнителей, отвечающих требованиям действующих стандартов, строительных норм и правил».

В табл. 1 СНиП 82-02-95 приведены базовые нормы расхода цемента марки 400 для различных классов бетона по прочности на сжатие для тяжелого бетона при твердении в естественных условиях и в условиях тепловой обработки, kg/m^3 , при отпускной прочности, % (55–60, 70, 80, 90, 100), при производстве изделий в условиях завода ЖБИ. Так, например, для твердеющего в нормальных условиях бетона наиболее применяемых в настоящее время в практике строительства классов В25 и В30 расход цемента составляет соответственно 365 и 415 kg/m^3 ; в условиях тепловой обработки: при отпускной прочности 55–60 % – соответственно 370 и 430 kg/m^3 , при отпускной

прочности 70 % – 380 и 440 кг/м³, при отпускной прочности 80 % – 400 и 450 кг/м³ соответственно.

Из вышеприведенных данных однозначно следует, что количества цемента, например, для бетона класса В25, необходимого для безусловного обеспечения всех нормируемых показателей качества бетона при естественном твердении, явно недостаточно для обеспечения тех же показателей качества бетона при тепловой обработке. При этом необходимо отметить, что термин «тепловая обработка» включает в себя все виды ТВО, в том числе и электротермообработку. Таким образом, расход цемента должен быть увеличен тем больше, чем выше величина отпускной прочности: 365–370–380–400 кг/м³ соответственно для твердения бетона класса В25 в естественных условиях, в условиях тепловой обработки при отпускной прочности (55–60) – 70–80 %. Следовательно, если необходима, например, отпускная прочность 70 % в условиях тепловой обработки, то расход цемента должен быть увеличен на 4,5 % по сравнению с бетоном, твердеющим в естественных условиях, а для бетона класса В30 – на 6,0 %.

В разделе 7 табл. 21 СНиП 82-02-95 приведены базовые нормы расхода цемента марки 400 для монолитных конструкций, кг/м³. Для классов бетона по прочности на сжатие В25 и В30 расход цемента соответственно составляет 380 и 440 кг/м³, что существенно выше для аналогичных классов бетонов естественного твердения при изготовлении конструкций в условиях завода ЖБИ (365 и 415 кг/м³). При этом в п. 7.14 однозначно указано: «Базовые нормы определены исходя из условия, что твердение бетона монолитных конструкций происходит в естественных условиях при температуре 15–25 °С с предотвращением влагопотерь». Таким образом, базовые нормы для бетона монолитных конструкций определены без учета того или иного вида тепловой обработки, например, прогрев греющими проводами или электроразогрев бетона в бадьях на строительной площадке. Следовательно, в случае применения на объекте любого вида тепловой обработки необходимо принимать базовый расход цемента в соответствии с табл. 21 (например, 380 кг/м³ для В25) и увеличивать его в зависимости от требуемой прочности в промежуточном возрасте (при снятии опалубки: 70–80–90 % от средней прочности в проектном возрасте) аналогично требованиям табл. 1 СНиП 82-02-95. В этом случае расход цемента для бетона класса В25 должен быть не менее соответственно 397, 418, 442 кг/м³. Таким образом, для сокращения сроков обогрева и получения при этом требуемой прочности бетона на сжатие в промежуточном возрасте необходимо увеличить расход цемента.

«Во многих случаях прогрев бетона на портландцементе (особенно на высокоалюминатном) при температуре 50 °С и выше вызывает снижение прочности, по сравнению с прочностью бетона нормального твердения, достигающее 25 % при неблагоприятных режимах» [15]. Объясняется это тем, что при 47–53 °С свойства воды меняются, так как именно в этом температурном интервале на графике «температура–диэлектрическая постоянная воды» появляется перегиб, а «в твердеющем цементном камне резко поризуются образовавшиеся к этому времени гидраты, что приводит к потере долговечности подвергаемого тепловой обработке бетона» [16].

А.И. Гныря и др., исследуя влияние температуры прогрева на механические свойства твердеющего цементного камня, установили, что «Температура прогрева оказывает существенное влияние на интенсивность роста прочности, а также на значения предела текучести» [17]. При этом на их графиках зависимости предела текучести σ и модуля упругости G от температуры наблюдается четкий перелом при температуре 50 °C особенно для времени твердения 30 и 43 ч, что, несомненно, связано с изменением свойств дисперсионной среды в указанном выше температурном интервале и хорошо согласуется с [15].

Выводы. 1. Рациональная температура электрообогрева бетона на цементе любого химико-минералогического состава на строительной площадке – 40–45 °C. Повышение температуры выдерживания бетона выше 40–45 °C нецелесообразно.

2. Минимальный период обогрева бетона, необходимый для достижения требуемой разопалубочной прочности, зависит от химико-минералогического состава цемента, основы суперпластификатора и расхода цемента.

3. Для обеспечения долговечности монолитных конструкций, выполненных методом электрообогрева, расход цемента должен быть увеличен не только по отношению к бетону, твердеющему в нормальных условиях, но и в зависимости от требуемой прочности бетона в промежуточном возрасте. Для получения необходимой прочности бетона в проектном возрасте расход цемента должен быть увеличен минимум на 7–9 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Титов М.М., Энхбатар Д. Современное состояние теории и практики зимнего бетонирования в Российской Федерации // Докл. междунар. конф., (Улан-Батор), 4–5 ноября 2016. Улаанбаатар хот 2016 от. С. 9–13.
2. Гныря А.И., Коробков С.В. Технология бетонных работ в зимних условиях. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2011. 412 с.
3. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Основы бетоноведения. СПб.: ООО «Строй-Бетон», 2006. 689 с.
4. Комохов П.Г. Температурный фактор электроразогрева в кинетике структурообразования и прочности бетона // Непрерывный электроразогрев бетонной смеси в строительстве: Тез. докл. совещания-семинара (Ленинград), 26–28 марта 1991. Л., 1991. С. 4–6.
5. Ли Ф.М. Химия цемента и бетона / пер. с англ. М.: Госстройиздат, 1961. 645 с.
6. Бердов Г.И., Мадзева О.С., Осипова Л.В., Трубцина Л.Б. Влияние заряда ионов электролитов на свойства цементного теста и прочности цементного камня // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1990. № 10. С. 57–63.
7. Bian R.B., Miao C.W., Shen J. Review of chemical structures and synthetic methods for polycarboxylate superplasticizers. Eighth CANMET/ ACI International Conference. Sorrento, Italy, 2006. Suppl. Papers. P. 133–144.
8. Ohta A., Sugiyama T., Tanaka Y. Fluidizing Mechanism and Application of Polycarboxylate-Based Superplasticizers // Proceedings Fifth CANMET Int. Conference. Rome, Italy, 1997. SP 173–179.
9. Yamada K. A summary of important characteristics of cement and superplasticizers. Proc. of Ninth ACI International Conference. Seville, Spain, 2009.

10. Regnaud L., Nonat A., Pouchet S. et al. Changes in cement paste and mortar fluidity after mixing induced by PCP: a parametric study. SP-239. P. 389–407.
11. Koizumi K., Umemura Y., Tsuchiya N. Effects of Chemical Admixtures on the Silicate Structure of Hydrated Portland Cement // Proceedings of the 12th international Congress on the Chemistry of Cement. Montreal, 2007. P. 64–71.
12. Yamada K., Ogawa S., Hanahara S. Working mechanism of poly-beta-naphthalene sulfonate and polycarboxylate superplasticizers types from point of cement paste characteristics. ACI SP-145. P. 367–382.
13. Венюа М. Влияние повышенных температур и давлений на гидратацию и твердение цемента // Шестой междунар. конгресс по химии цемента. М.: Стройиздат, 1976. Т. 2. Кн. 2. С. 109–128.
14. Скоморовски Е. Изучение структуры цементного теста, выдержанной при повышенной температуре // Шестой междунар. конгресс по химии цемента. М.: Стройиздат, 1976. Т. 2. Кн. 2. С. 146–151.
15. Миронов С.А. Теория и методы зимнего бетонирования. М.: Стройиздат, 1975. 700 с.
16. Бернштейн Л.Г., Афанасьева В.Ф., Юдович Б.Э. Цемент – бетон – качество строительства // Технология бетонов. 2014. № 1. С. 45–47.
17. Гныря А.И., Абзаев Ю.А., Коробков С.В., Бояринцев А.П., Мокшин Д.И., Гаусс К.С. Исследование влияния температуры прогрева на механические свойства твердеющего цементного камня // Вестн. ТГАСУ. 2017. № 6. С. 176–182.

Себелев Иван Михайлович, д-р техн. наук;

E-mail: isebelev@yandex.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Дугэрсурэн Энхбаатар, асп.;

E-mail: Enhbaatar Dugersuren [enkhbaatar1011@gmail.com]

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Титов Михаил Михайлович, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: [agd_tmm48@mail.ru]

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Карасёв Николай Павлович, доц.;

E-mail: [karasevn@mail.ru]

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 16.08.18

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

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

Dugersuren Enhbaatar, Post-graduate Student, E-mail: enkhbaatar1011@gmail.com

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

Titov Mikhail Mikhaylovich, DSc, Professor; E-mail: agd_tmm48@mail.ru

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

Karasev Nikolay Pavlovich, Ass. Professor; E-mail: karasevn@mail.ru

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

THE KINETICS OF THE CONCRETE STRENGTH WITH RUSSIAN AND MONGOLIAN CEMENTS AT DIFFERENT HARDENING TEMPERATURES

The kinetics for compressive strength of concrete growth research done with Iskitim (Russia) and Khutulsky (Mongolia) cements with SP-3 and Pantarhit additives at different

hardening temperatures. Determined the optimal temperature and curing period of monolithic concrete during its heating when the required concrete strength in the intermediate age and lately designed strength had been ensured. The increase of cement consumption in the heated concrete in comparison with the cement amount for concrete hardening under normal conditions had been justified. The increase in cement consumption depends on the required strength of concrete at an intermediate age (% of R₂₈).

Keywords: winter concreting, compressive strength, cement, cement consumption, additives, Mongolia.

REFERENCES

1. T i t o v M.M., J e n h b a a t a r D. Sovremennoe sostoyanie teorii i praktiki zimnego betonirovaniya v Rossiyskoy Federatsii [The current state of the theory and practice of winter concreting in the Russian Federation]. Doklady mezhdunarodnoy konferentsii, (Ulan Bator), 4–5 noyabrya 2016 [Reports of the international conference, (Ulan Bator), 4-5 Novembe 2016]. Ulaanbaatar Hot 2016 from. Pp. 9–13. (in Russian)
2. G n y r y a A.I., K o r o b k o v S.V. Tekhnologiya betonnykh rabot v zimnikh usloviyakh [Technology of concrete work in winter conditions]. Tomsk, Publishing house of TSUACE, 2011. 412 p.
3. D v o r k i n L.I., D v o r k i n O.L. Osnovy betonovedeniya [Basics of concrete science]. Sankt-Peterburg, OOO «Stroy-Beton», 2006. 689 p. (in Russian)
4. K o m o k h o v P.G. Temperaturnyy faktor elektrorazogreva v kinetike strukturo-obrazovaniya i prochnosti betona [Temperature factor of electrical heating in the kinetics of structure formation and concrete strength] . Nepreryvnyy elektrorazogrev betonnoy smesi v stroitel'stve: Tezisy dokladov soveshchaniya-seminara (Leningrad), 26–28 marta 1991 [Continuous electrical heating of the concrete mixture in construction: Abstracts of the workshop – seminar (Leningrad), March 26–28, 1991]. Leningrad, 1991. Pp. 4–6. (in Russian)
5. L i F.M. Khimiya tsementa i betona [Chemistry of cement and concrete]. Translation from English. Moscow, Gosstroyizdat, 1961. 645 p. (in Russian)
6. B e r d o v G.I., M a d z a e v a O.S., O s i p o v a L.V., T r u b i t s i n a L.B. Vliyanie zaryada ionov elektrolitov na svoystva tsementnogo testa i prochnosti tsementnogo kamnya [Influence of electrolyte ion charge on the properties of cement paste and cement stone strength]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News of Universities. Construction and Architecture]. 1990. No. 10. Pp. 57–63 (in Russian)
7. B i a n R.B., M i a o C.W., S h e n J. Review of chemical structures and synthetic methods for polycarboxylate superplasticizers. Eighth CANMET/ ACI International Conference. Sorrento, Italy, 2006. Suppl. Papers. Pp. 133–144.
8. O h t a A., S u g i y a m a T., T a n a k a Y. Fluidizing Mechanism and Application of Polycarboxylate-Based Superplasticizers. Proceedings Fifth CANMET Int. Conference. Rome, Italy, 1997, SP 173–179.
9. Y a m a d a K. A summary of important characteristics of cement and superplasticizers. Proc. of Ninth ACI International Conference. Seville, Spain, 2009.
10. R e g n a u d L., N o n a t A., P o u r c h e t S. et al. Changes in cement paste and mortar fluidity after mixing induced by PCP: a parametric study. SP-239. Pp. 389–407.
11. K o i z u m i K., U m e m u r a Y., T s u y u k i N. Effects of Chemical Admixtures on the Silicate Structure of Hydrated Portland' Cement. Proceedings of the 12th international Congress of the Chemistry of Cement. Montreal, 2007. Pp. 64–71.
12. Y a m a d a K., O g a w a S., H a n a h a r a S. Wjrkng mechanism of poly-beta-naphthalene sulfonate and polycarboxylate superplasticizers types from point of cement paste characteristics. ACI SP-145. Pp. 367–382.

13. Venyua M. Vliyanie povyshennykh temperatur i davleniy na gidratatsiyu i tverdenie tsementa [Influence of elevated temperatures and pressures on the hydration and hardening of cement]. Shestoy mezhdunarodnyy kongress po khimii tsementa [Sixth International Congress on the Chemistry of Cement]. Moscow, Stroyizdat, 1976. Vol. 2. Kn. 2. Pp. 109–128. (in Russian)
 14. Skomorovski E. Izuchenie strukturny tsementnogo testa, vyderzhannoy pri povyshennoy temperature [Study of the structure of cement paste, maintained at elevated temperature]. Shestoy mezhdunarodnyy kongress po khimii tsementa [Sixth International Congress on the Chemistry of Cement]. Moscow, Stroyizdat, 1976. Vol. 2. Kn. 2. Pp. 146–151. (in Russian)
 15. Mironov S.A. Teoriya i metody zimnego betonirovaniya [Theory and methods of winter concreting]. Moscow, Stroyizdat, 1975. 700 p. (in Russian)
 16. Bernshteyn L.G., Afanas'eva V.F., Yudovich B.E. Tsement – beton – kachestvo stroitel'stva [Cement – concrete – quality of construction]. Tekhnologiya betonov [Technology of concrete]. 2014. No.1. Pp. 45–47. (in Russian)
 17. Gnyrya A.I., Abzaev Yu.A., Krobkov S.V., Boyarintsev A.P., Mokshin D.I., Gauss K.S. Issledovanie vliyaniya temperatury progreva na mekhanicheskie svoystva tverdeyushchego tsementnogo kamnya [Study of the effect of heating temperature on the mechanical properties of hardening cement stone]. Vestnik TGASU [Bulletin of TGASU]. 2017. No. 6. Pp. 176–182. (in Russian)
-

ДОСТИЖЕНИЯ НАУКИ – ПРОИЗВОДСТВУ



УДК 621.878.2 : 621.396

Ю.В. АВДЕЕВ, А.Д. КОНОНОВ, А.А. КОНОНОВ, Н.А. ВАРДАНЯН

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИСКРЕТНЫХ КОМАНД В УСТРОЙСТВАХ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Рассматриваются основные тенденции развития систем автоматического дистанционного радиоуправления технологическими машинами дорожно-строительного комплекса, а также схемотехнические процессы, происходящие в устройствах передачи и приема команд управления. В результате исследования возможностей систем радиоканального управления предлагается вариант системы дистанционного радиоуправления строительно-дорожными машинами на основе использования кодово-импульсной модуляции сигнала, позволяющий оптимизировать независимое функционирование группы близкорасположенных технологических машин различного назначения. В системе используются разнесение команд управления по частоте и автоматическое обеспечение безопасного режима работы дорожно-строительных машин при ложном срабатывании устройства управления от радиопомех.

Ключевые слова: дистанционное управление, дорожно-строительные машины, дискретные команды, приемная и передающая части.

DOI 10.32683/0536–1052–2018–717–9–101–109

Введение. Важным направлением повышения эффективности использования дорожно-строительных машин и безопасности жизнедеятельности операторов является развитие систем дистанционного управления, для которого может быть использован навигационный метод [1].

При автоматизации процесса дистанционного управления технологическими машинами в дорожном строительстве с помощью разностно-дальномерной системы [2] необходимо выбрать такую траекторию движения, которая обеспечивала бы минимальные затраты времени и наименьшие погрешности при выполнении рабочего процесса, что становится особенно значимым, когда рассмотрение касается не только движения отдельной машины, но и функционирования комплекса технологических машин.

© Авдеев Ю.В., Кононов А.Д., Кононов А.А., Варданян Н.А., 2018

Перспективным и актуальным является применение дискретных команд и специальных методов модуляции и кодирования для управления группой мобильных технологических машин, которое позволит улучшить точностные характеристики и существенно снизить остроту проблемы электромагнитной совместимости при работе в ограниченном рабочем пространстве.

Разработки для управления движением группы строительных и дорожных машин (СДМ), работающих в одной протяженной рабочей зоне (например, строительство автомобильных дорог, взлетно-посадочных полос аэропортов и т.д.) и движущихся друг за другом, должны использовать ведущие и ведомые машины [3] с ориентиром в виде излучателя и воспринимающими элементами с устройствами преобразования сигналов в координаты и автоматическим управлением соответствующими исполнительными механизмами (ИМ) на ведомых СДМ.

Варианты схемной реализации. Рассмотрим возможные пути схемотехнической реализации дистанционного радиоканального управления (РКУ) технологическими машинами дорожно-строительного комплекса. В качестве известного примера приведем систему радиоуправления, базовый прототип которой заявлен в [4].

На рис. 1 показана схема передающей части системы РКУ, на которой изображены осевые кодеры (задатчики координат [5, 6]) 1, мультиплексор и преобразователь 2, модулятор 3, высокочастотный (ВЧ) передатчик 4, высокостабильный генератор 5, хронирующий генератор (таймер) 6.

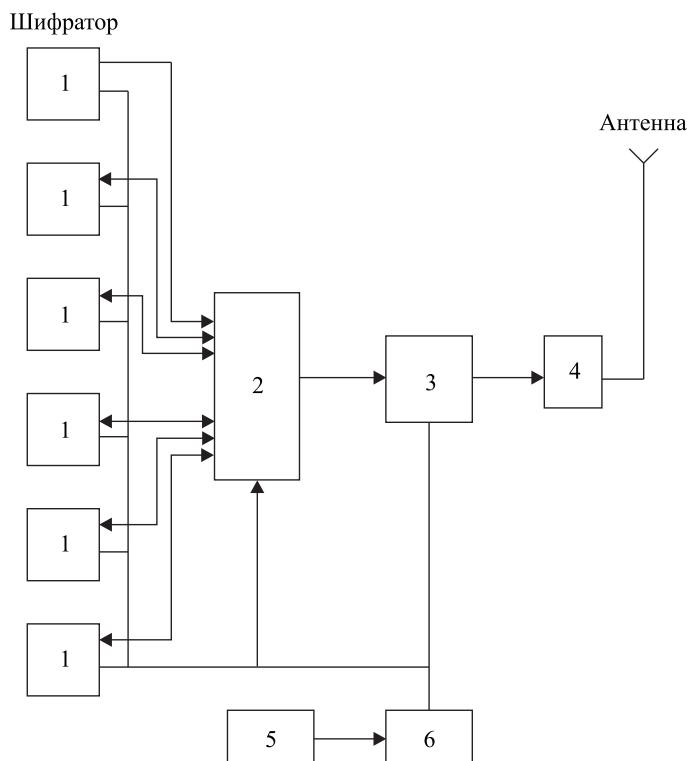


Рис. 1. Схема передающей части системы РКУ

Работа шифратора, кодопреобразователя, мультиплексора и модулятора 3 синхронизируется сигналом высокостабильного генератора 5. В качестве исходных кодирующих элементов использованы осевые кодеры 1, а в качестве кодопреобразователя используется преобразователь кода Грея в двоичный код. Сигнал в антенну поступает с выхода высокочастотного (ВЧ) генератора 4.

Приемная часть, изображенная на рис. 2, содержит ВЧ приемник 7, коррелятор 8, демультиплексор 9, хронирующий генератор 10, включенный после цепи фазовой синхронизации 11, компаратор (сравнивающее устройство) 12, осевые кодеры 13. Приемное устройство выполнено по корреляционной схеме. Схема РКУ достаточно проста, но ее возможности относительно невелики, а недостатки связаны с небольшим числом применяемых команд, невысоким уровнем универсальности при использовании команд, проблемами электромагнитной совместимости близко работающих строительных механизмов и узкой предназначенностю для работы со стационарными излучателями, что делает невозможным использование в режиме управления «ведущий мобильный объект – ведомый мобильный объект».

Ряд усовершенствований к базовому типу систем дистанционного управления дорожно-строительными машинами предложен в работах [7–15], обобщая которые можно указать, что они лишь частично или в частных случаях устраняют указанные недостатки.

Более совершенна, универсальна и лишена ряда недостатков предлагаемая система РКУ технологическими машинами с информационной связью, состоящая из комплектов оборудования ведущей и ведомой строительно-

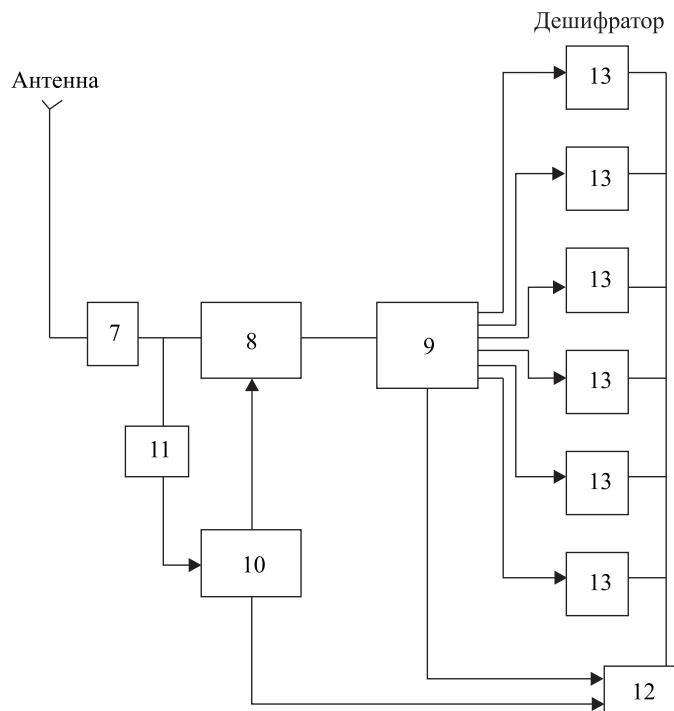


Рис. 2. Схема обработки принимаемых сигналов РКУ

дорожных машин и использующая дискретные команды с кодово-импульсной модуляцией (КИМ) и специальные методы кодирования сигнала, заключающиеся в следующем. Для обеспечения одновременной независимой работы нескольких близкорасположенных каналов радиоуправления используется их разнесение по частоте. В основу формирования команд управления положен принцип: две частоты из семи ($C_7^2 = 21$). Восьмая частота является стоповой и передается постоянно. Система позволяет передавать две команды одновременно, используя мультиплексор. Источники колебаний f_1, f_2, \dots, f_8 камерточного типа. Так как при передаче используется тональная частотная модуляция (ЧМ), то приемная часть содержит тракт усиления с преобразованием входной частоты более 150 МГц в более низкую промежуточную частоту с последующим детектированием ЧМ-сигнала. С выхода ЧМ-детектора сигнал поступает на избирательные элементы, настроенные соответственно на частоты f_1, f_2, \dots, f_8 и далее на детекторы и логическую схему. Стоповая частота f_8 формирует сигнал автоматической регулировки усиления (АРУ). Логическая схема осуществляет дешифрование команд управления и выдачу их на исполнительные элементы. Для исключения ложных срабатываний от радиопомех применяется так называемая проверочная схема, алгоритм работы которой заключается в том, что если входной сигнал состоит из более чем трех частот, исключая стоповую частоту, выходной сигнал этой схемы станет равным нулю и автоматически обеспечивается безопасный режим, например, включается тормозная система машины и трансмиссия возвращается в нейтральное положение.

На рис. 3 представлена схема радиоснаряжения ведущей машины, где изображены: радиостанция (приемник-излучатель) 1, коммутатор работы радиостанции 2, блок подтверждения команд 3, генератор команд 4, формирователь адресов 5, формирователь кодовой посылки 6, логическое устройство 7, формирователь импульсов 8, распределитель 9, схема совпадения 10, демодулятор 11, формирователь автоматического опроса 12, выходное устройство 13. Этот схемотехнический набор предназначен для формирования

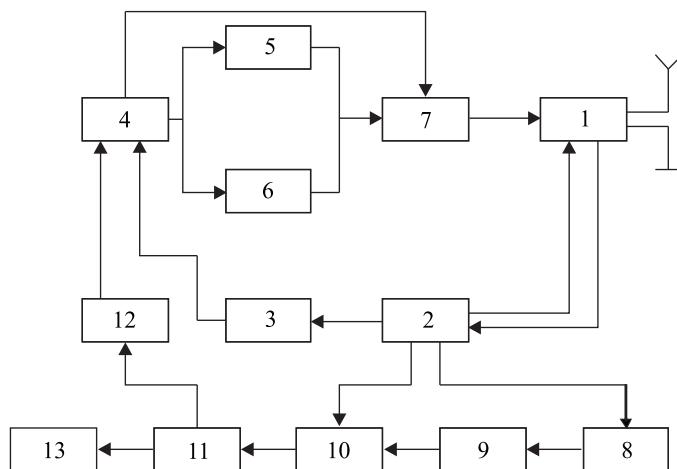


Рис. 3. Аппаратура для дистанционного управления, установленная на ведущей машине

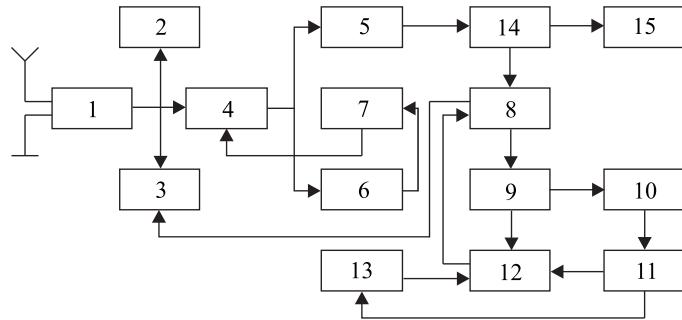


Рис. 4. Аппаратура для дистанционного управления, установленная на ведомой машине

и передачи кодовых посылок по двум каналам связи: прямому каналу (канал управления) и приема информации по обратному каналу (канал контроля параметров).

Комплект оборудования ведомой машины служит для приема информации по прямому каналу и передачи по обратному каналу. Схема подключения представлена на рис. 4, где введены обозначения: радиостанция 1, устройство инерционной защиты 2, адресный блок 3, блок избирательных фильтров 4, дешифратор команд 5, дешифратор групповой 6, разрешающий блок 7, коммутатор рода работы радиостанции 8, пусковое устройство 9, генератор импульсов 10, распределитель 11, модулятор импульсов 12, контролирующие параметры 13, выходное устройство 14, исполнительные элементы 15.

Следует отметить, что любая из команд может быть набрана оператором на пульте управления. По каналу связи она вновь ретранслируется с ведомой машины на ведущую и если она воспринята правильно, то на ведомую машину поступает команда-ответ и вся система переходит в соответствующее состояние. Если кодовая посылка потеряна, то через некоторое время она будет повторена. После трехкратного повторения при отсутствии подтверждения включается индикатор неисправности канала связи управления. В режиме контроля производится циклический опрос состояния контролируемых параметров ведомых машин.

Предлагаемый вариант кодирования управляющего сигнала и описанное устройство прошли успешные испытания при реальном производстве дорожных работ и показали перспективность применения для улучшения точностных характеристик и решения проблемы электромагнитной совместимости в задачах управления группой машин в ограниченном рабочем пространстве.

Экспериментальные исследования описанной системы РКУ показали, что в диапазоне 165,5–167,5 МГц возможно обеспечить надежное управление в режиме «ведущий – ведомый» на расстоянии до 150 м между объектами, чувствительность приемного устройства для надежного взаимодействия должна составлять не менее 3–5 мкВ при отношении сигнал/шум 20 дБ. Данные характеристики приемопередающих устройств позволяют обеспечить одновременное функционирование в ограниченной рабочей зоне группы технологических машин, при этом отклонение текущих координат объекта от

требуемой траектории не превышает 6 см, что вполне допустимо для большинства технологических операций в дорожном строительстве.

К сожалению, сравнительная количественная оценка достоинств предлагаемой системы управления комплексом технологических машин затруднена из-за отсутствия промышленно выпускаемых аналогов как зарубежного, так и отечественного производства. В частности, в доступной литературе отсутствуют данные, определяющие точностные характеристики траекторного перемещения мобильных объектов в режиме «ведущий – ведомый».

Выводы. 1. Приемы построения систем дистанционного радиоуправления технологическими машинами строительного комплекса имеют достаточно много общего.

2. При реализации предлагаемой системы целесообразно использование двух каналов связи, что хотя и повышает сложность и стоимость всей системы, но достаточно легко позволяет обеспечить нужное быстродействие и достоверность приема и обработки команд.

3. Проведено экспериментальное сравнение результатов дистанционного управления с применением разработанных технических устройств в режиме «ведущая машина – ведомая машина» с данными пультового управления единичным объектом при фиксированном положении передающих станций, приведенными в отечественных и зарубежных публикациях, показывающее их приемлемое совпадение. Погрешность траекторного сопровождения ведомой машины не превысила 6 см, что соответствует аналогичным точностным характеристикам [1] траекторных измерений даже при пультовом управлении мобильными объектами со стационарного положения.

Предварительные экспериментальные исследования, проведенные при производстве дорожных работ, показали работоспособность и перспективность применения предложенных схемотехнических решений для дистанционного управления технологическими машинами, имеют практическое значение и могут быть полезны разработчикам систем автоматического дистанционного управления машинами дорожно-строительного комплекса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Устинов Ю.Ф., Тепляков И.М., Кононов А.А., Авдеев Ю.В. Проблема построения систем дистанционного управления землеройно-транспортными машинами // Изв. вузов. Строительство. 2006. № 1. С. 83–86.
2. Устинов Ю.Ф., Тепляков И.М., Кононов А.А., Авдеев Ю.В. Основные концептуальные принципы автоматизации и дистанционного управления землеройно-транспортными машинами // Изв. вузов. Строительство. 2005. № 6. С. 65–67.
3. Авдеев Ю.В., Кононов А.Д., Кононов А.А., Варданян Н.А. К вопросу согласования работы информационных систем при автоматическом дистанционном управлении машинами дорожно-строительного комплекса // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 7(691). С. 75–82.
4. Pat. 4038590 US, MPK G 03 B 11/32. Impulse code modulation radio control system. Knowlton Lennik; appl. 03.07.1975; publ. 26.07.1977.

5. Авдеев Ю.В., Кононов А.Д., Кононов А.А., Варданян Н.А. Сравнительный анализ фазовых методов определения координат в задачах дистанционного автоматического управления машинами дорожно-строительного комплекса // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 1(661). С. 86–93.
6. Авдеев Ю.В., Кононов А.Д., Кононов А.А., Варданян Н.А. Метод компенсации погрешностей измерения координат при автоматическом дистанционном управлении машинами дорожно-строительного комплекса // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 8(668). С. 75–80.
7. Pat. 0976879 EP, MPK G 05 D 1/00. Remote radio operating system, and remote operating apparatus, mobile relay station and radio mobile working machine. Kajita Shigeo, Awano Katsusuke, Tozawa Shoji, Nishikawa Hiroyasu, Miki Masatoshi; publ. 20.12.2006.
8. Zelikov V.A., Posmetiev V.I., Latysheva M.A. Substantiation Based on Simulation Modeling of Hitch for Tillage Tools Parameters. World Applied Sciences Journal. 2014. Vol. 30. No. 4. P. 486–492.
9. Pat. 8272467 US, MPK G 03 B 11/32. Remotely controlled backhoe. M.A. Staab; publ. 25.09.2012.
10. Pat. 0282519 US, MPK G 03 B 11/32. Control system for a remote control work machine. M. Carlsson; publ. 17.11.2011.
11. Pat. 061515 WO, MPK G 03 B 11/32. Remote Control System. R.S. Ward, J.M. Law, L.A. Bloomquist; publ. 29.01.2002.
12. Vennapusa P.K.R., White D.J., Jahren C.T. Impacts of Automated Machine Guidance in Earthwork Operation. Proceedings of the Conference in Autonomous and Robotic Construction of Infrastructure. 2015. P. 207–216.
13. Alipour K., Abbaspour A. The Effect of Remote Center Compliance Parameters on Formation Control of Cooperative Wheeled Mobile Robots for Object Manipulation. International Journal of Control Automation and Systems. 2018. Vol. 16. P. 306–317.
14. Iizuka S., Matsunaga S., Suzuki S. Mobile Robot Navigation Control Tolerating a Change of Control Interval and Environment. Proceedings of SICE Annual Conference. 2013. P. 636–641.
15. Lutvica K., Kadic N., Dzamko G. Remote Position Control of Mobile Robot Based on Visual Feedback and ZigBee Communication. 53 International Symposium Elmar-2011. P. 169–172.

Авдеев Юрий Валентинович, канд. техн. наук, доц.

Воронежский государственный технический университет

Кононов Александр Давыдович, канд. физ.-мат. наук, доц.

Воронежский государственный технический университет

Кононов Андрей Александрович, д-р техн. наук; E-mail: kniga16@mail.ru

Воронежский государственный технический университет

Варданян Нара Арташесовна, асп.

Воронежский государственный технический университет

Получено после доработки 21.08.18

Avdeev Yuriy Valentinovich, PhD, Ass. Professor

Voronezh State Technical University, Russia

Kononov Alexandre Davydovich, PhD, Ass. Professor

Voronezh State Technical University, Russia

Kononov Andrey Alexandrovich, DSc; E-mail: kniga16@mail.ru

Voronezh State Technical University, Russia

Vardanyan Nara Artashesovna, Post-graduate Student

Voronezh State Technical University, Russia

TO THE PROBLEM OF USAGE OF DISCRETE COMMANDS IN THE UNITS OF REMOTE CONTROLLING A GROUP OF TECHNOLOGICAL MACHINES OF THE ROAD-BUILDING COMPLEX

The basic tendencies of development of systems of automatic remote radio controlling the technological machines of the road-building complex are considered, as well as the scheme-technical processes happening in the devices of transmission and reception of control instructions. As a result of the research of possibilities of systems of radiochannel control, the variant of a system of remote radio controlling the road-building machines on the basis of using the pulse-code signal modulation is offered, permitting to optimize the independent operation of a group of close-located technological machines of different assignment. In this system, the diversity of the control instructions on frequency and the self-acting security of a safe mode of operation of the road-building machines at a maloperation of the control unit because of radio noises are utilized.

K e y w o r d s: distance control, road-building machines, discrete commands, receiving and transmitting parts.

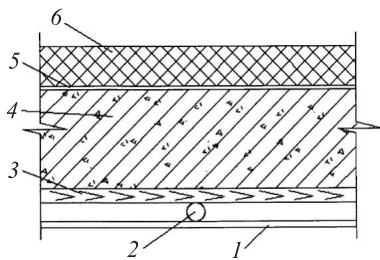
REFERENCES

1. Ustinov Yu.F., Teplyakov I.M., Kononov A.A., Avdeev Yu.V. Problema postroeniya sistem distantsionnogo upravleniya zemleroyno-transportnymi mashinami [Problem of build-up of remote control systems of autograders, scrapers and bulldozers]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2006. No. 1. Pp. 83–86. (in Russian)
2. Ustinov Yu.F., Teplyakov I.M., Kononov A.A., Avdeev Yu.V. Osnovnye kontseptual'nye printsyipy avtomatizatsii i distantsionnogo upravleniya zemleroyno-transportnymi mashinami [Main conceptual principles of automation and remote control of autograders, scrapers and bulldozers]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2005. No. 6. Pp. 65–67. (in Russian)
3. Avdeev Yu.V., Kononov A.D., Kononov A.A., Vardanyan N.A. K voprosu soglasovaniya raboty informatsionnykh sistem pri avtomaticeskem distantsionnom upravlenii mashinami dorozhno-stroitel'nogo kompleksa [To the problem of coordination of operation of information systems at automatic remote control by machines of road-building complex]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 7(691). Pp. 75–82. (in Russian)
4. Pat. 4038590 US, MPK G 03 B 11/32. Impulse code modulation radio control system. Knowlton Lennik; appl. 03.07.1975; publ. 26.07.1977.
5. Avdeev Yu.V., Kononov A.D., Kononov A.A., Vardanyan N.A. Sravnitel'nyy analiz fazovykh metodov opredeleniya koordinat v zadachakh distantsionnogo avtomaticeskogo upravleniya mashinami dorozhno-stroitel'nogo kompleksa [The comparative analysis of phase methods of a coordinates setting in problems of remote automatic control of machines of a road-building complex]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2014. No. 1 (661). Pp. 86–93. (in Russian)
6. Avdeev Yu.V., Kononov A.D., Kononov A.A., Vardanyan N.A. Metod kompensatsii pogreshnostey izmereniya koordinat pri avtomaticeskem distantsionnom upravlenii mashinami dorozhno-stroitel'nogo kompleksa [The Method of compensation of measuring errors of coordinates at the automatic remote control of autograders, scrapers and bulldozers]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2014. No. 8(668). Pp. 75–80. (in Russian)

7. Pat. 0976879 EP, MPK G 05 D 1/00. Remote radio operating system, and remote operating apparatus, mobile relay station and radio mobile working machine. Kajita Shigeo, Awano Katsusuke, Tozawa Shoji, Nishikawa Hiroyasu, Miki Masatoshi; publ. 20.12.2006.
8. Zelikov V.A., Posmetiev V.I., Latysheva M.A. Substantiation Based on Simulation Modeling of Hitch for Tillage Tools Parameters. World Applied Sciences Journal. 2014. No. 4. Vol. 30. Pp. 486–492.
9. Pat. 8272467 US, MPK G 03 B 11/32. Remotely controlled backhoe. M.A. Staab; publ. 25.09.2012.
10. Pat. 0282519 US, MPK G 03 B 11/32. Control system for a remote control work machine. M. Carlsson; publ. 17.11.2011.
11. Pat. 061515 WO, MPK G 03 B 11/32. Remote Control System. R.S. Ward, J.M. Law, L.A. Bloomquist; publ. 29.01.2002.
12. Vennapusa P.K.R., White D.J., Jahren C.T. Impacts of Automated Machine Guidance in Earthwork Operation. Proceedings of the Conference in Autonomous and Robotic Construction of Infrastructure. 2015. Pp. 207–216.
13. Alipour K., Abbaspour A. The Effect of Remote Center Compliance Parameters on Formation Control of Cooperative Wheeled Mobile Robots for Object Manipulation. International Journal of Control Automation and Systems. 2018. Vol. 16. Pp. 306–317.
14. Iizuka S., Matsunaga S., Suzuki S. Mobile Robot Navigation Control Tolerating a Change of Control Interval and Environment. Proceedings of SICE Annual Conference. 2013. Pp. 636–641.
15. Lutvica K., Kadic N., Dzamko G. Remote Position Control of Mobile Robot Based on Visual Feedback and ZigBee Communication. 53 International Symposium Elmar-2011. Pp. 169–172.

СПОСОБ ВОЗВЕДЕНИЯ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ

В Томском государственном архитектурно-строительном университете изобретен способ возведения монолитных железобетонных конструкций в зимних условиях. Изобретение может быть использовано в строительном производстве при возведении стен, колонн, плит перекрытия и прочих строительных железобетонных монолитных конструкций преимущественно в зимних условиях. Принцип действия этого способа включает размещение и закрепление на наружной стороне опалубки труб с жидкостным теплоносителем, которые в пределах одной захватки объединяют в единую гидравлическую систему и подсоединяют к источнику теплоснабжения. С наружной стороны обогревательных труб опалубку утепляют, например, с помощью щитов из стеклопластика, пеноплекса или влагостойкой фанеры (рисунок).



Опалубка для возведения железобетонных монолитных конструкций

1 – защитное наружное покрытие для утепления опалубки; 2 – труба с жидкостным теплоносителем; 3 – палуба опалубки; 4 – монолитная железобетонная плита перекрытия; 5 – влагонепроницаемая пленка; 6 – утеплитель

Перед укладкой бетона опалубку предварительно нагревают. Бетонную смесь, уложенную в прогретую опалубку, уплотняют и подвергают дальнейшему прогреву с последующим постепенным охлаждением за счет снижения температуры теплоносителя до +5 °C.

Предлагаемый способ отличается от аналогов:

- снижением трудозатрат и стоимости работ;
- экономичностью топливно-энергетических затрат;
- расширением области применения при высоком уровне качества.

На изобретение получен патент.

Разработчики:

Гныря Алексей Игнатьевич, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: tsp_tgasu@mail.ru

Бояринцев Александр Павлович, доц.;

E-mail: mr.boyarintsev.a@mail.ru

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

E-mail: korobkov_1973@mail.ru

634003, Россия, г. Томск, Соляная площадь, 2

Томский государственный архитектурно-строительный университет

www.tsuab.ru

Тел.: +7(3822) 65 51 02. Патентный отдел +7(3822) 65 95 55

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» 2018 г.

Каталожная цена за 6 месяцев – 4500 р.
Цена отдельного номера – 750 р.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Общая информация о журнале и полнотекстовые версии номеров журнала, начиная с 2003 года, размещены на Internet-странице по адресу <http://izvuzstr.sibstrin.ru>

Для оформления научных статей по требованиям ВАК, РИНЦ, Scopus размещены

«ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ, ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И РЕДАКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ РУКОПИСЕЙ СТАТЕЙ».

Внимание!

1. Объем аннотации – не менее 800 знаков (75 слов и более), максимум 1200 знаков.
2. Библиографический список должен включать не менее десяти источников.
3. 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 /, –, //, 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» за 2018 год.

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

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

ББК 38
И 33
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО**

№ 9 (717) 2018

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 27.09.18. Формат 70×108 $\frac{1}{16}$
Усл. печ. л. 9,63+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 4240

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