

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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 6 (714)
Июнь 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. Бальзаников, 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. Гайсбаур, д-р – инж., Институт аэрогазодинамики, Университет Штутгарта, 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. Караулов, 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. Нугужинов, 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. Сколупович, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
И.С. Соболев, 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

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ

Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н., Карпенко С.Н., Кадиев Д.З. О построении диаграммного метода расчета стержневых железобетонных конструкций в условиях действия низких отрицательных температур 5

Талантова К.В. Разработка конструкций на основе сталефибробетона с заданными характеристиками в зданиях, возводимых в сейсмоопасных районах ... 18

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

Сколубович Ю.Л., Пазенко Т.Я., Колова А.Ф., Войтов Е.Л., Волков Д.Д., Гогина Е.С. Реагентная очистка промывных вод фильтров 27

Хецуриани Е.Д., Бондаренко В.Л. Водозаборные технологические комплексы в составе природно-технических систем многоцелевого водоснабжения 38

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Хорошилов В.С., Барлиани А.Г., Губонин П.Н. Прогнозирование процесса перемещений высоконапорной плотины Саяно-Шушенской ГЭС на этапе эксплуатации после аварии 2009 г. 48

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

Кузнецова В.Н., Савинкин В.В. Исследование распределения мощности силовой установки гидропривода экскаватора при выполнении строительных работ 63

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ, ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКОЛОГИИ

Ануфриева Н.А. Инфраструктурное развитие приграничных автомобильных постов 72

Семикин П.П., Бацунова Т.П. Динамическая архитектура. Кинетические фасады 86

Субботин О.С., Бондаренко С.А. Роль материала в реставрации памятников архитектурного наследия 97

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Конин Д.В., Олуромби А.Р. Анализ устойчивости прямошовных и спиральношовных труб из высокопрочных сталей при центральном и внецентренном сжатии на примере натурных экспериментов 106

Попов И.И., [Россихин Ю.А.], Шитикова М.В. Экспериментальное исследование влияния возраста бетона на величину контактной силы и времени контакта при ударе по вязкоупругой балке 117

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

NEWS OF HIGHER EDUCATIONAL
INSTITUTIONS

CONSTRUCTION

No. 6 (714)

June 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 (Physics and Math), 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

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND STRUCTURES. BASES AND FOUNDATIONS

- Karpenko N.I., Yarmakovskiy V.N., Karpenko S.N., Kadiyev D.Z.** On the construction of the diagram of calculation method of rod structures under the action of low negative temperatures 5
- Talantova K.V.** Development of steel fiber concrete structures with specified characteristics in buildings, constructed in earthquake-prone regions 18

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

- Skolubovich Yu.L., Pazenko T.Ya., Kolova A.F., Voytov E.L., Volkov D.D., Gogina E.S.** Reagent purification of washing filters 27
- Khetsuriani E.D., Bondarenko V.L.** Water technological complexes composed of natural-technical systems multi-purpose water 38

HYDRO-ENGINEERING CONSTRUCTION, HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

- Khoroshilov V.S., Barliani A.G., Gubonin P.N.** The forecasting process of movement pressure of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant during the operational phase after the 2009 accident 48

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION

- Kuznetsova V.N., Savinkin V.V.** Investigation of power distribution of power unit of the excavator hydraulic drive in the implementation of construction works 63

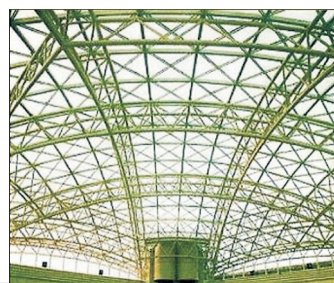
SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE, TOWN PLANNING AND ECOLOGY

- Anufrieva N.A.** Infrastructure development frontier automobile posts 72
- Semikin P.P., Batsunova T.P.** Dynamic architecture. Kinetic facades 86
- Subbotin O.S., Bondarenko S.A.** The role of material in the restoration of architectural heritage 97

SECTION OF SCIENTIFIC METHODOLOGY

- Konin D.V., Olurombi A.R.** The buckling analysis of direct-welding and spiral-welding tubes made of high-strength steels at central and eccentric compression based on experiment 106
- Popov I.I., Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V.** Experimental investigation of the effect of the concrete age on the contact force and contact time during the impact upon a viscoelastic beam 117

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ



УДК 624.072

Н.И. КАРПЕНКО, В.Н. ЯРМАКОВСКИЙ, С.Н. КАРПЕНКО, Д.З. КАДИЕВ

О ПОСТРОЕНИИ ДИАГРАММНОГО МЕТОДА РАСЧЕТА СТЕРЖНЕВЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ НИЗКИХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР

В результате обобщения и анализа данных целенаправленных экспериментальных исследований установлено значительное влияние низких отрицательных температур на развитие напряжений и деформаций в железобетонных конструкциях от силовых воздействий. Показано, что указанное влияние в значительной степени зависит от различных структурно-технологических факторов (характеристик состава бетона, водоцементного отношения, его структуры, естественной влажности бетона). Обоснована необходимость учета этих факторов влияния при расчете железобетонных конструкций на прочность, деформативность и трещиностойкость при одновременных силовых и температурных воздействиях. Разработаны диаграммы деформирования бетона в замороженном до -70°C состоянии. С учетом этих диаграмм дано развитие диаграммного метода, который позволяет рассчитывать железобетонные стержневые конструкции при одновременном воздействии силовых нагрузок и низких климатических (до -70°C) отрицательных температур.

К л ю ч е в ы е с л о в а: низкие отрицательные температуры, бетон, структура, влажность, деформации, диаграммы деформирования, диаграммный метод.

Введение, цель и задачи исследования. В настоящее время в связи с планами расширения добычи нефти и газа в северных регионах России, в том числе в условиях Арктического шельфа, и построения соответствующих плавающих терминалов, а также резервуаров для хранения сжиженных природных газов и их транспортировки на плаву в терминалах вместе с проблемой обеспечения требований долговечности железобетонных конструкций этих сооружений становится актуальной проблема разработки новых методов расчета конструкций, эксплуатируемых в условиях одновременного воздействия силовых нагрузок и значительных по величине низких отрицательных температур.

Известно, что стойкость бетона в условиях воздействия отрицательных температур (морозостойкость бетона) характеризуется определенным количеством циклов попеременного замораживания и оттаивания, после которых прочность бетона снижается до регламентируемой величины (см. ГОСТ

© Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н., Карпенко С.Н., Кадиев Д.З., 2018

10060–2012, первый базовый метод). Однако этой характеристики недостаточно для реальной оценки долговечности железобетонных конструкций. Для этого требуется оценка влияния низких отрицательных температур, прежде всего климатических (вплоть до -70°C), на основные нормативные прочностные и деформативные характеристики бетона, необходимые для расчета и проектирования бетонных и железобетонных конструкций, эксплуатируемых в таких условиях. Итоги экспериментальных исследований приведены в работе [1] и, впоследствии, в развитие этой работы – в основополагающей монографии профессора, доктора технических наук В.М. Москвина¹ в соавторстве с его учениками.

Результаты вышеуказанных экспериментальных исследований прочностных и деформативных свойств бетона в замороженном до различных температур, вплоть до -70°C , состоянии обобщены с позиций решения проблемы долговечности железобетонных конструкций, эксплуатируемых в суровых климатических условиях в [2, 3]. В работе [3] было показано, что деградация свойств такого материала (конгломератного типа) как бетон наиболее полно отражается в диаграммной методике расчета и ее развитии. Начальную основу этой методики составляли диаграммы деформирования бетона и арматуры в обычных условиях действия положительных температур.

В работе Н.И. Карпенко и др. [3] с учетом данных экспериментальных исследований [4] предложено уточнение диаграмм деформирования бетона применительно к действию низких отрицательных температур до -150°C . Представленные в данной работе результаты обработки экспериментальных исследований [1, 5] показали, что на диаграммы деформирования бетона, кроме отрицательных температур, в значительной степени влияет такой технологический фактор, как исходная влажность бетона на момент его замораживания. Учтено и влияние низких отрицательных температур на коэффициенты температурных деформаций бетона и арматуры, а также на диаграммы деформирования арматуры. Все эти факторы учитываются в уравнениях расчетной диаграммной методики.

В настоящей работе на основании анализа экспериментальных данных [1] и дальнейшего их развития в вышеуказанной монографии В.М. Москвина с его учениками, а также в работе [2] поставлены следующие задачи исследований:

1) выполнить математическую обработку экспериментальных данных по прочностным и деформативным характеристикам тяжелого бетона для определения коэффициентов изменения этих характеристик по соответствующим формулам в зависимости от исходной влажности бетона и температуры его замораживания;

2) используя результаты обработки экспериментальных данных (см. задачу 1), осуществить корректировку диаграмм деформирования бетона под нагрузкой осевого сжатия в условиях действия низких отрицательных темпе-

¹ Москвин В.М., Капкин М.М., Савицкий А.Н., Ярмаковский В.Н. Бетон для строительства в суровых климатических условиях. Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1973. 168 с.

ратур (до -70°C) в сравнении с диаграммами деформирования бетона под такой же нагрузкой в условиях действия положительных температур;

3) установить характер влияния низких температур на изменение показателей прочности, начального модуля упругости, относительных деформаций бетона в вершинах диаграмм, построенных при испытании под нагрузками осевого сжатия в диапазоне температур от $+20$ до -70°C ;

4) определить влияние на характеристики построенных диаграмм таких структурно-технологических показателей бетона, как его водоцементное отношение (В/Ц), а следовательно, и структура, а также исходная влажность (массовое отношение влаги, $\text{\%/}\%$).

Диаграммы деформирования бетона с учетом влияния низких отрицательных температур и влажности бетона на изменение его прочности, начального модуля упругости и предельных деформаций при осевом сжатии. Связи между относительными деформациями и напряжениями бетона при осевом сжатии в замороженном состоянии записываются в виде

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma_b}{E_{bT} \nu_b}, \quad (1)$$

где ε_b , σ_b , E_{bT} – соответственно относительные деформации, напряжения и модуль упругости бетона в замороженном состоянии

$$E_{bT} = E_b \beta_E, \quad (2)$$

где E_b – модуль упругости бетона в начальных условиях (при $t = 20^{\circ}\text{C}$ и соответствующей влажности W , $\text{\%}$);

β_E – коэффициент изменения начального модуля упругости бетона в замороженном состоянии;

ν_b – коэффициент изменения секущего модуля ($\nu_b E_{bT}$ – секущий модуль бетона в замороженном состоянии).

Обработка данных экспериментальных исследований, приведенных в работе [1] и монографии В.М. Москвина по бетонам с различной естественной влажностью при $\text{В/Ц} = 0,4$ и $\text{В/Ц} = 0,5$, показала, что в среднем при изменении влажности в диапазоне $W = 3,1\text{--}5,1\text{ \%}$ можно принять

$$\beta_E = 1 + \left[0,025 + 0,12 \left(\frac{W \text{ \%} - 3 \text{ \%}}{1 \text{ \%}} \right) \right] \left(\frac{20^{\circ}\text{C} - t^{\circ}\text{C}}{90^{\circ}\text{C}} \right). \quad (3)$$

Представленные ниже зависимости также определяются для диапазона влажности бетона $W = 3,1\text{--}5,1\text{ \%}$ при хранении до замораживания и испытания под нагрузкой в течение 28 сут в камере нормально-влажностного твердения (в условиях температуры воздуха $T = 20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ и его влажности $\varphi_{\text{в}} = 90\text{ \%} \pm 5\text{ \%}$).

Призменная прочность бетона R_b , которая равна напряжениям $\hat{\sigma}_{bT}$ в вершине диаграммы замороженного бетона, определяется по зависимости

$$\hat{\sigma}_{bT} = \hat{\sigma}_b \beta_R, \quad (4)$$

где $\hat{\sigma}_b$ – напряжение в вершине диаграммы бетона в начальных условиях испытаний (при $t = 20^{\circ}\text{C}$ и соответствующей влажности W , $\text{\%}$);

β_R – коэффициент влияния низких температур на увеличение напряжений в вершине диаграммы. Анализ экспериментальных данных [1] показал, что

$$\beta_R = 1 + \left[0,10 + 0,45 \left(\frac{W \% - 3 \%}{1 \%} \right) \right] \left(\frac{20^\circ \text{C} - t^\circ \text{C}}{90^\circ \text{C}} \right). \quad (5)$$

Напряжениям $\hat{\sigma}_{bT}$ соответствуют увеличенные деформации $\hat{\varepsilon}_{bT}$ в вершине диаграммы

$$\hat{\varepsilon}_{bT} = \hat{\varepsilon}_b \beta_\varepsilon, \quad (6)$$

где $\hat{\varepsilon}_b$ – относительные деформации в вершине диаграммы бетона в нормальных условиях. По данным [2] для тяжелого бетона

$$\hat{\varepsilon}_b = 200 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt[5]{R_b / R_0}, \quad (7)$$

где $R_0 = 20$ МПа.

Обработка данных экспериментальных исследований [1] показывает следующее:

$$\beta_\varepsilon = 1 + \left[0,05 \left(\frac{W \% - 3 \%}{1 \%} \right) + 0,085 \left(\frac{W \% - 3 \%}{1 \%} \right)^2 \right] \left(\frac{20^\circ \text{C} - t^\circ \text{C}}{90^\circ \text{C}} \right). \quad (8)$$

Определив $\hat{\sigma}_{bT}$, $\hat{\varepsilon}_{bT}$ и E_{bT} , можно вычислить коэффициент секущего модуля $\hat{\nu}_{bT}$, соответствующий вершине диаграммы

$$\hat{\nu}_{bT} = \frac{\hat{\sigma}_{bT}}{\hat{\varepsilon}_{bT} E_{bT}}. \quad (9)$$

Секущий модуль бетона для промежуточных уровней нагружения $\eta = \frac{\sigma_b}{\hat{\sigma}_{bT}}$ определяется по зависимости, представленной в работе [3] с учетом коррективки η и $\hat{\nu}_{bT}$

$$\nu_b = \hat{\nu}_{bT} + (1 - \hat{\nu}_{bT}) \sqrt{1 - \omega_1 \eta - (1 - \omega_1) \eta^2}, \quad (10)$$

где ω_1 – параметр кривизны диаграммы:

$$\text{для восходящей ветви } \nu_0 = 1; \omega_1 = 2 - 2,5\hat{\nu}_{bT}, \quad (11)$$

для нисходящей ветви $\nu_0 = 2,05\hat{\nu}_b; \omega_1 = 1,95\hat{\nu}_{bT} - 0,138$.

После определения ν_b для разных уровней напряжений по формуле (1) вычисляются величины относительных деформаций тяжелого бетона ε_b , замороженного до различных температур и строятся соответствующие диаграммы деформирования. На рис. 1 представлены диаграммы деформирования бетона при исходной влажности $W_1 = 3,2\%$ и $W_2 = 5,1\%$, испытанного при различных температурах (от $+20$ до -70°C).

При одноосном растяжении ($\sigma_0 = \sigma_{bt}$, $\hat{\sigma}_{bT} = \hat{\sigma}_{btT}$):

$$\hat{\sigma}_{btT} = R_{bt} \beta_{Rt}, \quad (12)$$

$$\hat{\nu}_{btT} = (0,6 + 0,15 R_{bt} / R_{b0}) / \gamma_{bT}, \quad (13)$$

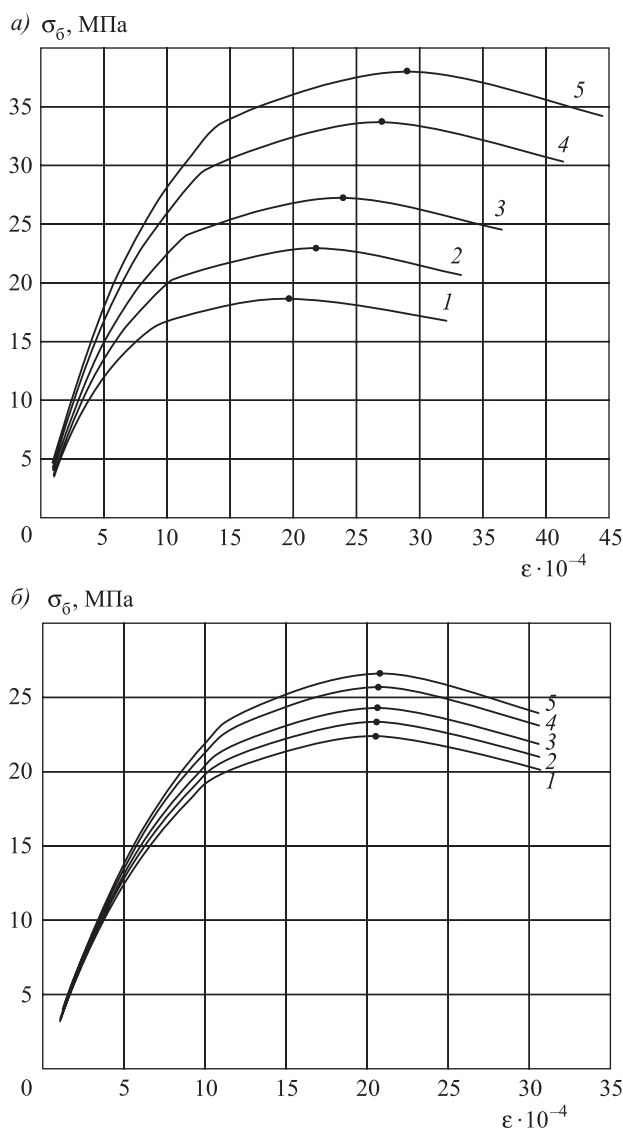


Рис. 1. Диаграммы деформирования при осевом сжатии бетона с исходной влажностью $W = 5,1 \%$ (а) и $W = 3,2 \%$ (б) в диапазоне температур от $+20$ до -70 °С (точками на кривых диаграмм обозначены деформации бетона при $\sigma = R_{tp}$)

σ_b – напряжение осевого сжатия; ϵ – продольные деформации бетонных образцов при осевом сжатии

1 – 20 °С; 2 – 0 °С; 3 – (-20) °С; 4 – (-50) °С; 5 – (-70) °С

где $R_{b0} = 2,5$ МПа, β_{Rt} – коэффициент увеличения прочности бетона на осевое растяжение.

Согласно данным экспериментальных исследований [4], можно принять:

$$\beta_{Rt} = 1 + \left[0,15 + 0,5 \left(\frac{W \% - 3 \%}{1 \%} \right) \right] \left(\frac{20^\circ \text{C} - t^\circ \text{C}}{90^\circ \text{C}} \right); \quad (14)$$

$$\gamma_{bT} = 1 + 0,1 \left(\frac{W \% - 3 \%}{1 \%} \right) \left(\frac{20^{\circ}\text{C} - t^{\circ}\text{C}}{90^{\circ}\text{C}} \right). \quad (15)$$

Параметры v_{bt} , ω_1 при осевом растяжении вычисляются по зависимостям (10), (11) при замене $\hat{v}_{bT}$ на $\hat{v}_{bt}$, v_b на v_{bt} .

Диаграммы деформирования арматуры в условиях действия низких отрицательных температур. Диаграммы деформирования арматуры строятся в соответствии с зависимостями, приведенными в [3], с дополнительным учетом влияния низких отрицательных температур. Низкие отрицательные температуры сказываются на пределе текучести $\sigma_{0,2}$ и модуле упругости E_s арматуры, которые в условиях действия низких температур обозначаются $\sigma_{0,2T}$ и E_{sT} . Согласно данным, представленным в [4], можно принять:

$$E_{sT} = E_s \left[1 + 0,19 \left(\frac{20^{\circ}\text{C} - t^{\circ}\text{C}}{210^{\circ}\text{C}} \right) \right]; \quad (16)$$

$$E_{sT} = E_s \left[1 + 0,19 \left(\frac{20^{\circ}\text{C} - t^{\circ}\text{C}}{210^{\circ}\text{C}} \right) \right]. \quad (17)$$

Зависимость между напряжениями и деформациями арматуры по аналогии с (1) принимается в виде

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s v_s}, \quad (18)$$

где на линейном участке диаграммы $v_s = 1$, на нелинейном участке v_s определяется по модифицированной формуле (10), где $v_b, \hat{v}_b, \eta$ заменяются соответственно на величины $v_s, \hat{v}_s, \eta$, которые устанавливаются в зависимости от вида нелинейных участков диаграмм деформирования арматуры согласно рекомендациям [3].

Зависимость (19) используется для описания деформаций элемента в сечениях или части сечений, где отсутствуют трещины. При этом соблюдается условие совместности деформаций арматуры и бетона ($\varepsilon_s = \varepsilon_b$). В части сечения с трещиной это условие нарушается и вводятся средние деформации арматуры ε_s на участке между трещинами, которые определяются по зависимости

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s \psi_s}{E_s v_s} = \frac{\sigma_s}{E_s v_{sm}}, \quad (19)$$

где $v_{sm} = v_s / \psi_s$, ψ_s – коэффициент В.И. Мурашева, учитывающий влияние растянутого бетона между трещинами на средние деформации арматуры, который может определяться по формуле работы [3].

Изменения коэффициентов температурных деформаций бетона. Согласно экспериментальным исследованиям [1], коэффициент температурных деформаций $\alpha_{bt^{\circ}}$ в значительной степени зависит от исходной влажности бетона при воздействии отрицательных температур. Так, для бетона с ес-

тественной влажностью после выдерживания в режиме нормально-влажностного твердения в диапазоне температур от $+20$ до 0 °С средняя величина $\alpha_{bt^0} \approx 0,9 \cdot 10^{-5}$ град. $^{-1}$, при изменении температуры от 0 до -40 °С, $\alpha_{bt^0} \approx 1,13 \cdot 10^{-5}$ град. $^{-1}$, от -40 до -70 °С, $\alpha_{bt^0} \approx 0,9 \cdot 10^{-5}$ град. $^{-1}$. Коэффициент температурных деформаций арматуры в диапазоне температур от $+20$ до -70 °С согласно данным [1] остается постоянным и равным $\alpha_{st^0} \approx 1 \cdot 10^{-5}$ град. $^{-1}$.

Построение физических соотношений диаграммной модели с учетом влияния низких отрицательных температур. Представленные выше зависимости между напряжениями и деформациями бетона и арматуры (диаграммы их деформирования), а также коэффициенты температурных деформаций, служат основой для построения физических соотношений применительно к расчету железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях действия низких отрицательных температур [3].

Рассмотрим построение соотношений применительно к расчету стержневых железобетонных конструкций.

На рис. 2 представлена расчетная схема нормального сечения железобетонного элемента, подвергаемого действию двух моментов: M_x (в плоскости ZOY) и M_y (в плоскости ZOX) и нормальной силы N , действующей вдоль оси Z . Положение точки 0 в начале координат x, y, z в принципе может быть произвольным, однако ее рационально помещать в центр тяжести сечения, который определяется в упругой стадии деформирования элемента.

При выводе физических соотношений растягивающие напряжения и усилия принимаются за положительные, а сжимающие – за отрицательные. Температуры замораживания бетона и арматуры также принимаются отрицательными. В части сечения с трещинами бетон выключается из работы

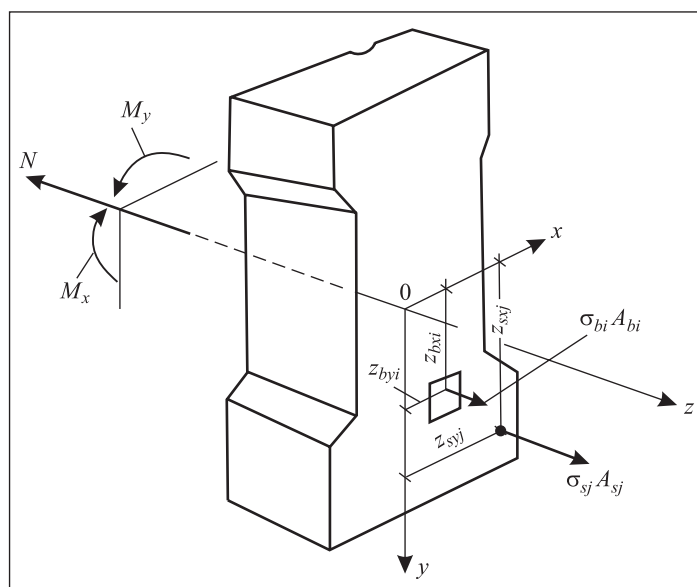


Рис. 2. Расчетная схема нормального сечения железобетонного элемента

и все усилия передаются на арматуру. В этой области диаграмма свободной арматуры $\sigma_s - \varepsilon_x$ заменяется на диаграмму $\sigma_s - \varepsilon_{sm}$, где σ_s – напряжения арматуры в трещине; ε_{sm} – средние относительные деформации на участке между трещинами. Средние деформации ε_{sm} определяются по методике В.И. Мурашева. Изменение относительных деформаций бетона и арматуры ε_e ($e = b, bt, s, sm$) по высоте сечения железобетонного элемента следует гипотезе плоских сечений [3].

При выводе физических соотношений используется численное интегрирование. Сечение железобетонного элемента (см. рис. 2) разделяется на i элементарных участков бетона с площадями A_{bi} и координатами их центров тяжести Z_{bxi}, Z_{byi} (i – номер участка бетона). Арматурные стержни, попадающие в области сечения с трещиной, фиксируются площадью каждого стержня A_{sj} и координатами его центра тяжести Z_{sxj}, Z_{syj} . Соответственно для стержней вне области с трещиной аналогичные параметры стержней обозначаются A_{sk}, Z_{sxk}, Z_{syk} . Следует учитывать знаки координат в принимаемой системе x, y, z (см. рис. 2). Вводятся обозначения: $\sigma_{bi}, \varepsilon_{bi}$ – напряжения и относительные деформации бетона в элементах i (на участках с трещинами $\sigma_{bi} = 0$); $\sigma_{si}, \varepsilon_{sj}$ – напряжения в стержнях арматуры j -х номеров в трещинах и их средние деформации; $\sigma_{sk}, \varepsilon_{sk}$ – напряжения и относительные деформации в стержнях арматуры k -х, расположенных в части сечения без трещин.

При выводе физических соотношений используются:

– уравнения равновесия внешних сил и внутренних усилий в нормальном сечении элемента

$$\begin{aligned} M_x &= \sum_i \sigma_{bi} A_{bi} z_{bxi} + \sum_k \sigma_{sk} A_{sk} z_{sxk} + \sum_j \sigma_{sj} A_{sj} z_{sxj}, \\ M_y &= \sum_i \sigma_{bi} A_{bi} z_{byi} + \sum_k \sigma_{sk} A_{sk} z_{syk} + \sum_j \sigma_{sj} A_{sj} z_{syj}, \\ N &= \sum_i \sigma_{bi} A_{bi} + \sum_k \sigma_{sk} A_{sk} + \sum_j \sigma_{sj} A_{sj}; \end{aligned} \quad (20)$$

– уравнения, определяющие распределение деформаций по сечению элемента, которые следуют из гипотезы плоских сечений [3]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= \varepsilon_0 + \frac{1}{r_x} z_{bxi} + \frac{1}{r_y} z_{byi}, \\ \varepsilon_k &= \varepsilon_0 + \frac{1}{r_x} z_{sxk} + \frac{1}{r_y} z_{syk}, \\ \varepsilon_j &= \varepsilon_0 + \frac{1}{r_x} z_{sxj} + \frac{1}{r_y} z_{syj}; \end{aligned} \quad (21)$$

– установленные выше связи между напряжениями и деформациями бетона и арматуры в виде диаграмм их деформирования при действии низких температур; $1/r_x, 1/r_y$ – кривизны элемента, ε_0 – относительные деформации на уровне оси z .

Напряжения σ_{bi} на участках бетона i , напряжения в арматурных стержнях σ_{sk} на участках бетона без трещин и напряжения σ_{sj} в стержнях на участках элемента с трещинами определяются по зависимостям:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{bi} &= (\varepsilon_i - \varepsilon_{bi}^0) E_{bT} \nu_{bi}; \\ \sigma_{sk} &= (\varepsilon_k - \varepsilon_{sk}^0) E_{sT} \nu_{sk}; \\ \sigma_{sj} &= (\varepsilon_j - \varepsilon_{sj}^0) E_{sT} \nu_{smj} \end{aligned} \right\}, \quad (22)$$

где $\varepsilon_i, \varepsilon_k, \varepsilon_j$ – общие деформации, $\varepsilon_{bi}^0, \varepsilon_{sk}^0, \varepsilon_{sj}^0$ – относительные деформации от действия низких температур

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{bi}^0 &= \alpha_{bi} \Delta t_i; \\ \varepsilon_{sk}^0 &= \alpha_s \Delta t_k; \\ \varepsilon_{sj}^0 &= \alpha_s \Delta t_j \end{aligned} \right\}. \quad (23)$$

$\Delta t_i, \Delta t_k, \Delta t_j$ – приращения температур на участках i, k, j относительно нормальной температуры $t = +20^\circ \text{C}$.

В дальнейшем в зависимости (23) вносятся выражения (22), (24) для $\varepsilon_i, \varepsilon_k, \varepsilon_j, \varepsilon_{bi}^0, \varepsilon_{sk}^0, \varepsilon_{sj}^0$ и полученные таким образом значения $\sigma_{bi}, \sigma_{sk}, \sigma_{sj}$ вносятся в (21). В результате приходим к общим физическим соотношениям вида

$$\left\{ \begin{matrix} M_x \\ M_y \\ N \end{matrix} \right\} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{12} & D_{22} & D_{23} \\ D_{13} & D_{23} & D_{33} \end{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} \frac{1}{r_x} \\ \frac{1}{r_y} \\ \varepsilon_0 \end{matrix} \right\} - \left\{ \begin{matrix} M_{tx}^0 \\ M_{ty}^0 \\ N_t^0 \end{matrix} \right\}, \quad (24)$$

где $M_{tx}^0, M_{ty}^0, N_t^0$ – условные (эквивалентные) усилия, вызванные температурными деформациями ε_{bi}^0 – в бетоне, $\varepsilon_{sj}^0, \varepsilon_{si}^0$ – в арматуре, определяемые по формулам (25–27).

В физических соотношениях стержневых элементов, установленных на основании указанных предпосылок, связывается трехкомпонентный вектор-столбец усилий в сечении $\{M\}$, куда входят два момента M_x, M_y (действующих в двух плоскостях) и нормальная сила N с трехкомпонентным вектор-столбцом $\{\varepsilon\}$ деформаций, куда входят кривизны $1/\rho_x, 1/\rho_y$ и относительное удлинение ε_0 на уровне выбранной продольной оси, матрица жесткости $[D]$ размером 3×3 , а также вектор-столбец условных усилий от температурных воздействий $\{M_t^0\}$, т.е.

$$\left\{ \begin{matrix} M_x \\ M_y \\ N \end{matrix} \right\} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{12} & D_{22} & D_{23} \\ D_{13} & D_{23} & D_{33} \end{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} \frac{1}{r_x} \\ \frac{1}{r_y} \\ \varepsilon_0 \end{matrix} \right\} - \left\{ \begin{matrix} M_{tx}^0 \\ M_{ty}^0 \\ N_t^0 \end{matrix} \right\}, \quad (25)$$

где M_{tx}^0 , M_{ty}^0 , N_{ty}^0 – условные (эквивалентные) усилия, вызванные температурными деформациями ε_{bi}^0 – в бетоне, ε_{sj}^0 , ε_{si}^0 – в арматуре, определяемые по формулам:

$$\left. \begin{aligned} M_x^0 &= \sum_i \varepsilon_{bi}^0 A_{bi} z_{bxi} E_{bT} v_{bi} + \sum_k \varepsilon_{sk}^0 A_{sk} z_{sxx} E_{sTk} v_{sk} + \sum_j \varepsilon_{sj}^0 A_{sj} z_{sxj} E_{sTj} v_{smj}; \\ M_y^0 &= \sum_i \varepsilon_{bi}^0 A_{bi} z_{byi} E_{bT} v_{bi} + \sum_k \varepsilon_{sk}^0 A_{sk} z_{syk} E_{sTk} v_{sk} + \sum_j \varepsilon_{sj}^0 A_{sj} z_{syj} E_{sTj} v_{smj}; \\ N_y^0 &= \sum_i \varepsilon_{bi}^0 A_{bi} E_{bT} v_{bi} + \sum_k \varepsilon_{sk}^0 A_{sk} E_{sTk} v_{sk} + \sum_j \varepsilon_{sj}^0 A_{sj} E_{sTj} v_{smj} \end{aligned} \right\}; \quad (26)$$

D_{ij} – жесткости элемента, которые вычисляются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} D_{11} &= \sum_i A_{bi} z_{bxi}^2 E_{bT} v_{bi} + \sum_k A_{sk} z_{sxx}^2 E_{sTk} v_{sk} + \sum_j A_{sj} z_{sxj}^2 E_{sTj} v_{smj}; \\ D_{12} &= \sum_i A_{bi} z_{bxi} z_{byi} E_{bT} v_{bi} + \sum_k A_{sk} z_{sxx} z_{syk} E_{sTk} v_{sk} + \sum_j A_{sj} z_{sxj} z_{syj} E_{sTj} v_{smj}; \\ D_{13} &= \sum_i A_{bi} z_{bxi} E_{bT} v_{bi} + \sum_k A_{sk} z_{sxx} E_{sTk} v_{sk} + \sum_j A_{sj} z_{sxj} E_{sTj} v_{smj}; \\ D_{22} &= \sum_i A_{bi} z_{byi}^2 E_{bT} v_{bi} + \sum_k A_{sk} z_{syk}^2 E_{sTk} v_{sk} + \sum_j A_{sj} z_{syj}^2 E_{sTj} v_{smj}; \\ D_{23} &= \sum_i A_{bi} z_{byi} E_{bT} v_{bi} + \sum_k A_{sk} z_{syk} E_{sTk} v_{sk} + \sum_j A_{sj} z_{syj} E_{sTj} v_{smj}; \\ D_{33} &= \sum_i A_{bi} E_{bT} v_{bi} + \sum_k A_{sk} E_{sTk} v_{sk} + \sum_j A_{sj} E_{sTj} v_{smj} \end{aligned} \right\}; \quad (27)$$

v_{bi} , v_{sk} , v_{smj} – коэффициенты секущих модулей, которые вычисляются на основании аналитических зависимостей для диаграмм (1), (19), (20) деформирования бетона и арматуры.

Установленные физические соотношения могут использоваться в различных построениях конечных элементов. Ввиду физической нелинейности для расчета конструкций (определения усилий и перемещений), как правило, применяются шагово-итерационные методы. Физические соотношения (26) для сложных конструктивных систем рационально записывать в конечных приращениях, что приводит к экономичным слабоитерационным и безытерационным методам решения физически нелинейных задач.

Следует отметить, что результаты выполненных в данной работе исследований по построению диаграмм деформирования тяжелого бетона согласуются:

- с представленными в работах С.Н. Леоновича [6] и Ю.В. Зайцева [4] физическими моделями процесса фазового перехода воды в лед в порах и капиллярах цементного камня бетона;

- теориями и гипотезами морозного разрушения бетона в зависимости от характеристик его структуры, в частности от его дифференциальной пористости, которая в значительной степени влияет на развитие гидравлического давления в гелевых порах и порах-капиллярах цементного камня бето-

на; последнее при условии, когда исходная влажность бетона W превышает предельную ($W > W_{\text{пр}}$, где $W_{\text{пр}}$ соответствует достижению степени водонасыщения цементного камня бетона критического значения – более 90 %). Это может приводить сначала к развитию необратимых микротрещин в стенках пор и капилляров, а в дальнейшем – к образованию и развитию так называемой «магистральной трещины» [4] и в конечном счете – к прогрессирующему разрушению бетона;

– характером диаграмм «напряжения осевого сжатия в замороженном до различных температур бетоне – продольные деформации», приведенных в [4, 6], а также в работах зарубежных исследователей [7–9].

Заключение. Установлены общие физические соотношения, связывающие моменты M_x , M_y и нормальную силу N с обобщенными деформациями (кривизнами $1/r_x$, $1/r_y$ и ε_0 – относительными деформациями на уровне выбранной оси z) с учетом влияния низких отрицательных температур. Физические соотношения позволяют вести расчет железобетонных конструкций с учетом влияния температурных факторов современными вычислительными методами, например, методом конечных элементов.

Начальную основу физических соотношений составляют диаграммы, связывающие напряжения и деформации бетона и арматуры при действии низких температур. На основании обобщения экспериментальных данных выполнена корректировка диаграмм бетона. При этом учтено влияние низких температур на повышение прочности бетона, его начального модуля упругости и относительных деформаций в вершинах диаграмм до температуры, примерно равной -70°C .

Показано, что увеличение прочности, начального модуля упругости и предельных относительных деформаций в вершинах диаграмм в значительной степени зависит от влажности бетона на момент его замораживания. При более низких, чем -70°C температурах, большинство опытов указывают, что повышение прочностных и деформативных характеристик бетона практически прекращается. Это может быть обосновано результатами исследований поэтапного процесса фазового перехода воды в лед. Однако данный вопрос еще требует дальнейших целенаправленных исследований. Влияние указанных факторов сказывается также на диаграммах арматуры, хотя в значительно меньшей степени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ярмаковский В.Н. Прочностные и деформативные характеристики бетона при низких отрицательных температурах // Бетон и железобетон. 1971. № 10.
2. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 1. С. 93–103.
3. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. С. 92–126.
4. Зайцев Ю.В., Леонович С.Н. Прочность и долговечность конструктивных материалов с трещиной. Минск: БНТУ, 2010. С. 224–245.

5. Истомин А.Д. Работа центрально-растянутых железобетонных элементов при отрицательной температуре // Изв. вузов. Строительство и архитектура. Технология текстильной промышленности. 2017. № 2. С. 141–144.
6. Леонович С.Н. Прочность конструкционных бетонов при циклическом замораживании–оттаивании с позиции механики разрушения. Брест, 2006. 379 с.
7. Jia-Bao Yan, Jian Xie. Behaviours of reinforced concrete beams under low temperatures // Construction and Building Materials (China). ELSEVIER. 2017. Vol. 141. P. 410–425.
8. Rostasy F.S., Wiedemann G. Stress-strain-behaviour of concrete at extremely low temperature // Cement and Concrete Research (USA). 1980. Vol. 10. P. 565–572.
9. Wang C.X., Xie J., Li H.J. Experimental research on the properties of concrete under low-temperature // Eng. Mech. 2011. Vol. 28 (S2). P. 182–186.

Карпенко Николай Иванович, д-р техн. наук, проф., акад. Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН); E-mail: niisf_lab9@mail.ru

Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), г. Москва

Ярмаковский Вячеслав Наумович, канд. техн. наук; E-mail: yarmakovsky@yandex.ru

Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), г. Москва

Карпенко Сергей Николаевич, д-р техн. наук; E-mail: niisf_lab9@mail.ru

Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), г. Москва

Кадиев Давид Заурбекович, асп.; E-mail: yarmakovsky@yandex.ru

Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), г. Москва

Получено 31.05.18

Karpenko Nikolay Ivanovich, DSc, Professor, Academician of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS); E-mail: niisf_lab9@mail.ru

Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAACS), Moscow, Russia

Yarmakovskiy Vyacheslav Naumovich, PhD; E-mail: yarmakovsky@yandex.ru

Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAACS), Moscow, Russia

Karpenko Sergey Nikolaevich, DSc; E-mail: niisf_lab9@mail.ru

Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAACS), Moscow, Russia

Kadiev David Zaurbekovich, Post-graduate Student; E-mail: yarmakovsky@yandex.ru

Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAACS), Moscow, Russia

ON THE CONSTRUCTION OF THE DIAGRAM OF CALCULATION METHOD OF ROD STRUCTURES UNDER THE ACTION OF LOW NEGATIVE TEMPERATURES

As a result of generalization and analysis of the data in the field of experimental studies, the significant influence of low negative temperatures on the development of stresses and strains in reinforced concrete structures from force effects was established. It is shown that this influence largely depends on various structural and technological factors (characteristics of the composition of concrete, its structures, water-cement ratio, the

natural moisture content of concrete). The necessity of taking into account these factors of influence in the calculation of reinforced concrete structures on the strength, deformability and crack resistance at the same time power and temperature effects has been established. Diagrams of deformation of concrete in the frozen to minus 70 °C condition are developed. Taking into account these diagrams the development of the diagram method is given, which allows to calculate reinforced concrete core structures under simultaneous influence of power loads, and low climatic (to minus 70 °C) negative temperatures.

Key words: low negative temperature, concrete, structure, humidity, strain, deformation diagram, the diagram method.

REFERENCES

1. Yarmakovskiy V.N. Prochnostnye i deformativnye kharakteristiki betona pri nizkikh otritsatel'nykh temperaturakh [Strength and deformation characteristics of concrete at low temperatures]. Beton i zhelezobeton [Concrete and Reinforced concrete]. 1971. No. 10. (in Russian)
2. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovskiy V.N., Erofeyev V.T. O sovremennykh metodakh obespecheniya dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruksiy [Modern methods for ensure the durability of reinforced concrete structures]. Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo [Architecture and construction]. 2015. No. 1. Pp. 93–103. (in Russian)
3. Karpenko N.I. Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona [General models of reinforced concrete mechanics]. Moscow, Stroyizdat, 1996. Pp. 92–126. (in Russian)
4. Zaytsev Yu.V., Leonovich S.N. Prochnost' i dolgovechnost' konstruktivnykh materialov s treshchinoy [Strength and durability of structural materials with cracks]. Minsk, 2010. Pp. 224–245. (in Russian)
5. Istomin A.D. Rabota tsentral'no-rastyanutykh zhelezobetonnykh elementov pri otritsatel'noy temperature [The work of central stretched concrete elements with negative temperature]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti [Proceedings of the Universities. Construction and architecture. Technology of textile industry]. 2017. No. 2. Pp. 141–144. (in Russian)
6. Leonovich S.N. Prochnost' konstruksionnykh betonov pri tsiklicheskom zamorazhivanii–ottaivanii s pozitsii mekhaniki razrusheniya [Structural concrete strength during cyclic freezing-thawing from the position of fracture mechanics]. Brest, 2006. 379 p. (in Russian)
7. Jia-Bao Yan, Jian Xie. Behaviours of reinforced concrete beams under low temperatures. Construction and Building Materials (China). ELSEVIER. 2017. Vol. 141. Pp. 410–425.
8. Rostasy F.S., Wiedemann G. Stress-strain-behaviour of concrete at extremely low temperature. Cement and Concrete Research (USA). 1980. Vol. 10. Pp. 565–572.
9. Wang C.X., Xie J., Li H.J. Experimental research on the properties of concrete under low-temperature. Eng. Mech. 2011. Vol. 28 (S2). Pp. 182–186.

УДК 624.012.45+624.042.7

К.В. ТАЛАНТОВА

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА С ЗАДАНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ В ЗДАНИЯХ, ВОЗВОДИМЫХ В СЕЙСМООПАСНЫХ РАЙОНАХ*

Рассмотрены вопросы повышения эксплуатационной надежности и безопасности зданий, возводимых в сейсмоопасных районах. Представлены требования, предъявляемые к элементам конструкций, их стыкам и соединениям при сейсмических воздействиях. Показана возможность задавать свойства конструкций в соответствии с условиями их эксплуатации, используя строительный композит – сталефибробетон, а также современные программные средства, известные в практике проектирования (ПБК Лира, SCAD и т.п.) и специально разрабатываемые. Представлены результаты численных исследований, посвященных определению рациональной длины и диаметра стальных фибр, определяющих эффективность выбора их геометрии для элементов на основе сталефибробетона, подверженных динамическим воздействиям. Показан программный модуль, с помощью которого (по результатам расчета ПБК SCAD) выполняется конструктивный расчет стыков с комбинированным армированием ригеля с колонной и колонны с колонной. Программный модуль позволяет определить рациональные зоны укладки сталефибробетонной смеси в стыках. При этом характеристики сталефибробетона в стыках заданы в соответствии с усилиями, полученными в результате расчета на сейсмические нагрузки.

Ключевые слова: землетрясение, обеспечение безопасности и надежности, пластические деформации, поглощение энергии, фибра стальная, сталефибробетон, сталефиброжелезобетон, заданные свойства, программные средства.

Введение. Сейсмические катаклизмы сопровождают человечество на протяжении всей истории его развития. И на сегодняшний день проблема защиты зданий от сейсмических воздействий стоит очень остро. Вместе с тем сложность расчета на сейсмические нагрузки с одновременным учетом большого количества параметров, определяющих эксплуатационную надежность здания в условиях сейсмических воздействий, привела к практической необходимости создания новых методов проектирования и автоматизации расчетов.

Наиболее уязвимы в здании узлы и сопряжения. В связи с этим поставлена задача разработки решения, обеспечивающего их надежную работу на усилия от совместного действия статических и сейсмических нагрузок.

Сейсмические воздействия. Обеспечение сейсмостойкости зданий. В последние годы важным положением в теории сейсмостойкого строительства объектов, возводимых в сейсмоопасных районах, является отказ от применения материалов, разрушающихся хрупко. Один из способов повыше-

* В статье представлены результаты исследований, выполненных при участии А.Н. Трошкина, Т.В. Гордыман, С.С. Толстуневой.

ния сейсмостойкости объектов – вариант активной сейсмозащиты на контакте фундаментов и основания [1]. Среди недостатков таких систем необходимо отметить возникновение существенных местных напряжений при работе на вертикальные нагрузки, для восприятия которых требуется дополнительная арматура. Использование сталефибробетона со свойствами, заданными в соответствии с напряжениями в зонах, испытывающих местное сжатие (смятие), позволяет обеспечить несущую способность, трещиностойкость и деформативность и свести к минимуму чрезмерное армирование регулярной арматурой, а также снизить трудоемкость их устройства.

Результаты испытаний узлов соединения ригелей с колоннами в железобетонных каркасах показывают, что основным условием нормальной работы каркаса и его узлов, особенно при повторных знакопеременных нагрузках, является ограничение боковых перемещений бетона. Если такое ограничение не обеспечено, бетон раскалывается при изгибающих моментах, намного меньших, чем моменты без учета этого фактора. Небольшого числа циклов достаточно для того, чтобы свести несущую способность узла практически к нулю. Более того, уже при сравнительно невысоких напряжениях возникают большие косые трещины [2, 3]. Для повышения прочности и выносливости узлы густо армируются сетками или хомутами [3, 4], с целью создания пассивной сейсмозащиты.

Железобетонные элементы пассивной сейсмозащиты не могут в полной мере противостоять сейсмическому воздействию в связи с хрупкой работой бетона. Необходимо применение материалов, обладающих высокой деформативностью, одним из них, как уже упоминалось выше, является современный строительный композит – сталефибробетон (СФБ).

Сталефибробетон. СФБ по сравнению с исходным бетоном обладает весьма значительной деформативностью и вязкостью при разрушении¹. Кроме того, он отличается более высокой, чем бетон и железобетонные конструкции (ЖБК), стойкостью против выкрашивания, усталостных процессов, а также ударной вязкостью, обладает способностью претерпевать значительные деформации без разрушения, сохраняет прочность на растяжение и срез после начавшегося трещинообразования. Испытания показали, что применение СФБ обеспечивает эффективную защиту элементов конструкций от хрупкого разрушения [5–7].

Свойства СФБ зависят от свойств исходного бетона, его прочностных и деформативных характеристик, а также геометрических характеристик стальных волокон (диаметра d_f и длины l_f), их физико-механических характеристик (прочности на растяжение R_{sf} , модуля упругости E_{sf} и др.), сцепления с бетоном – матрицей [6–9].

Кроме того, свойства СФБ зависят от объемного содержания стальных фибр в бетонной матрице [5–7]. Все это дает возможность управлять свойствами материала и в каждом конкретном случае получать именно тот СФБ, который требуется для проектируемой конструкции (рис. 1), что позволяет совершенствовать существующие и разрабатывать новые решения сейсмозащиты зданий.

¹ Рекомендации по проектированию и изготовлению сталефибробетонных конструкций / НИИЖБ Госстроя СССР. М., 1987. 148 с.

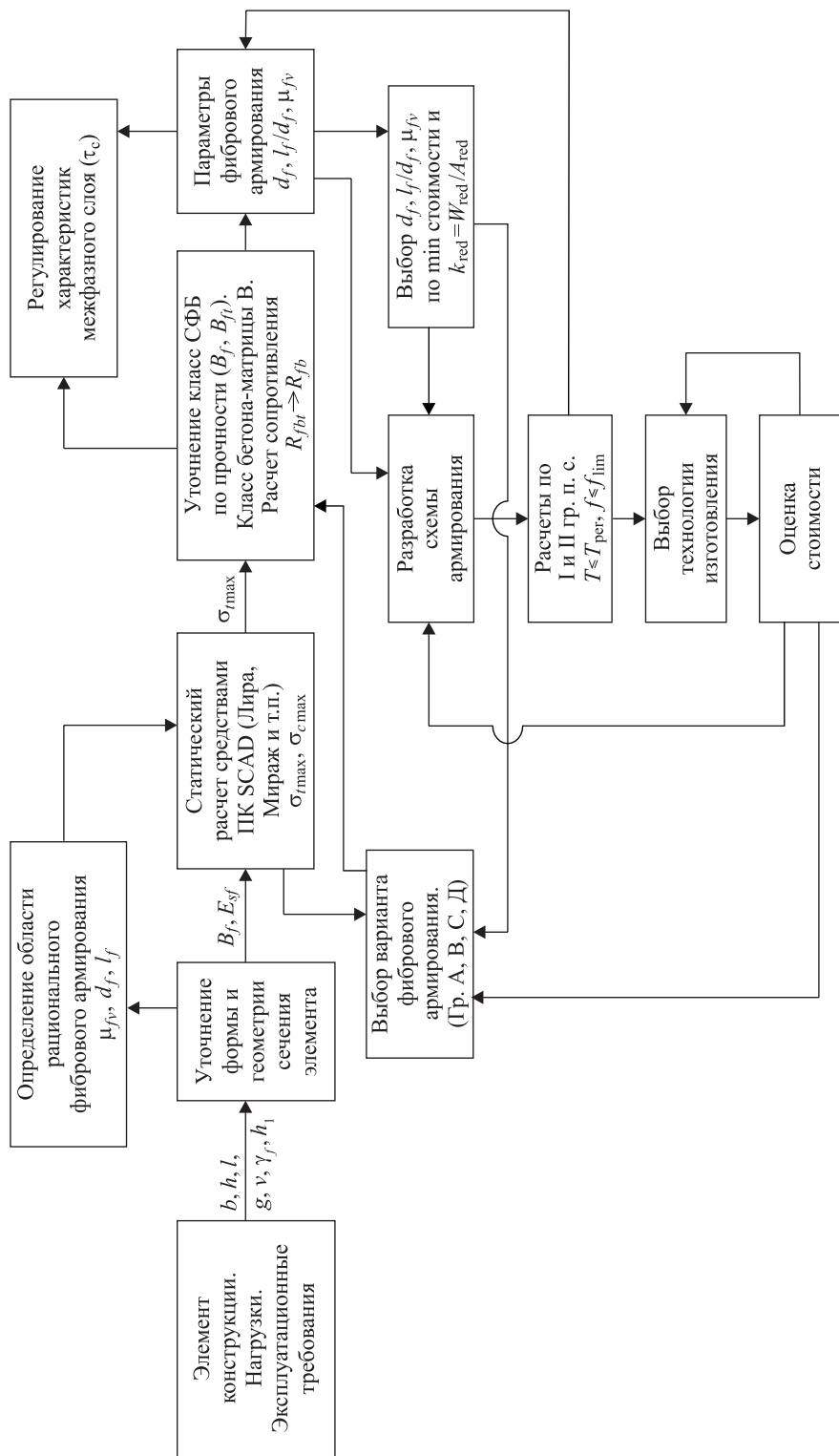


Рис. 1. Алгоритм разработки элементов конструкций на основе сталефибробетона с заданными свойствами

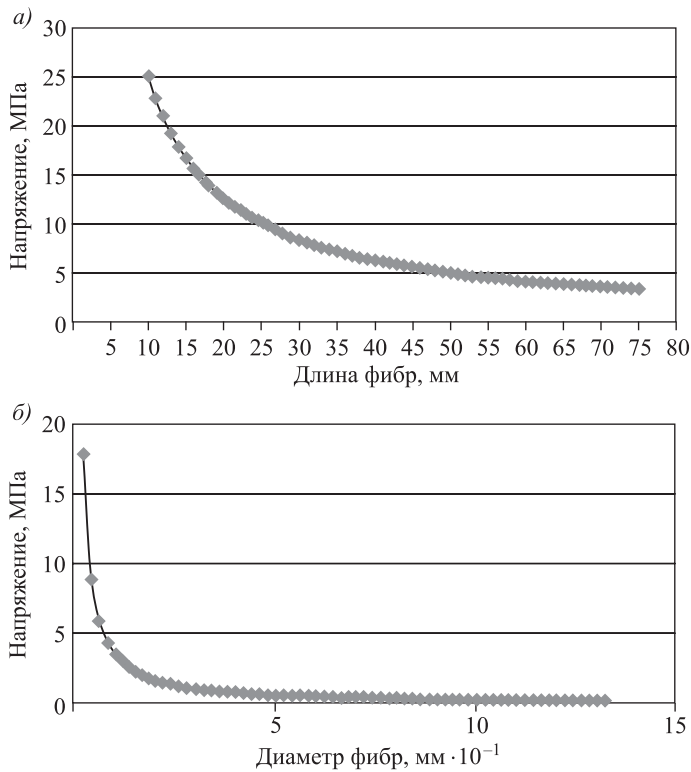


Рис. 2. Зависимость напряжений при динамических воздействиях на сталефибробетонный элемент от длины (а) и диаметра (б) фибр

Исследования показали, что для повышения эффективности СФБ в узлах соединений конструкций в сейсмоопасных районах целесообразно использовать фибры малых диаметров и длины [10–12] (рис. 2).

По данным ОДМ² предел выносливости сталефиброжелезобетонных конструкций выше железобетонных на 30 % и составляет $0,95 R_{bm}$. После микроразрушений развитие трещин и разрушение в СФБ наступает по времени медленнее, чем в ЖБК не менее чем в 10 раз.

Расчеты, выполненные по данным¹, с учетом результатов исследований динамической прочности СФБ [11–13], подтвердили результаты численного анализа.

Динамическая прочность СФБ, которой можно управлять (как и другими его свойствами) выбором характеристик и количества компонентов в соответствии с эксплуатационными требованиями, дает основание его рекомендовать для практического применения в строительных конструкциях, испытывающих динамические воздействия.

Определение зоны комбинированного армирования в стыке ригеля с колонной. СФБ вместо косвенного армирования (сетками и пр.) в узлах и соединениях элементов зданий обеспечивает развитие в них пластических

² ОДМ 218.2.014–2011. Методические рекомендации по применению сталефибробетона при ремонте мостовых сооружений / Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). М., 2011. 80 с.

деформаций за счет его физико-механических свойств, а также упрощает их устройство совмещением двух процессов в один – армирования и бетонирования¹ [5–7].

Эксперимент в Киевском ИСИ (ВУГАСУ) показал, что замена сетчатого армирования узла его омоноличиванием СФБ уменьшает деформации растяжения в 2–4 раза, при снижении роста деформаций в узлах в 1,5–2 раза [5].

В представляемых исследованиях зона устройства стыка с применением СФБ определяется в соответствии с полями напряжений, полученными в результате расчета каркаса средствами ВК SCAD на действие статических и сейсмических нагрузок. По их результатам выполняется конструктивный расчет элементов здания, проверка их несущей способности и жесткости с помощью программы «Сейсмозащита», которая разрабатывается применительно к гражданским каркасным зданиям.

В качестве исходных данных для разрабатываемой программы приняты: район строительства, характеристика здания (рамный или связевый каркас, габариты, этажность и т.п.), временная полезная нагрузка на перекрытие.

Из наиболее неблагоприятных сочетаний усилий в соответствующих конечных элементах формируется файл, который передается в программу конструктивного расчета «Сейсмозащита». Программа реализуется в среде визуального программирования Delphi на языке Object Pascal. Рабочие чертежи запроектированных узлов каркаса выполняются в AutoCAD средствами AutoLISP.

При вводе пользователем номера узла анализируется файл и находятся элементы, примыкающие к узлу. Значения усилий известны, как минимум, для трех сечений элемента – по середине и на концах. Имея эти данные, методом квадратичной аппроксимации определяется значение усилия в любой точке элемента. При этом то сечение, в котором внутренний момент больше либо равен внешнему, является границей зоны укладки СФБ в стыке (рис. 3). Граница зоны фибрового армирования стыка проверяется расчетом нормальных сечений на действующий внешний момент в выбранной точке и проверкой наклонных сечений. Таким образом, в бесконсольном стыке отрицательный момент воспринимается продольной растянутой и сжатой арматурами (3 и 4 на рис. 3) совместно с сечением СФБ, имеющим характеристики, заданные внешним усилием.

Представленное решение развивает в узле пластические деформации благодаря способности СФБ к вязкому разрушению и поглощению энергии. Другими словами, его способности воспринимать значительные деформации без повреждений, а также высокой сопротивляемости материала на сдвиг [7–9].

Технология устройства комбинированного варианта стыка ригеля с колонной обеспечивает сплошность в зоне сопряжения железобетонного и сталефиброжелезобетонного сечений за счет сродства материалов и анкерующей способности СФБ смеси, анкеровки и сварных соединений продольной арматуры (см. рис. 3).

Бескаркасные (кирпичные) здания. Как известно, более предпочтительной конструктивной схемой зданий, проектируемых в сейсмоопасных районах, является железобетонный каркас. Однако нередко при строительстве заказчики выбирают кирпичные здания. При этом, зачастую, в целях эко-

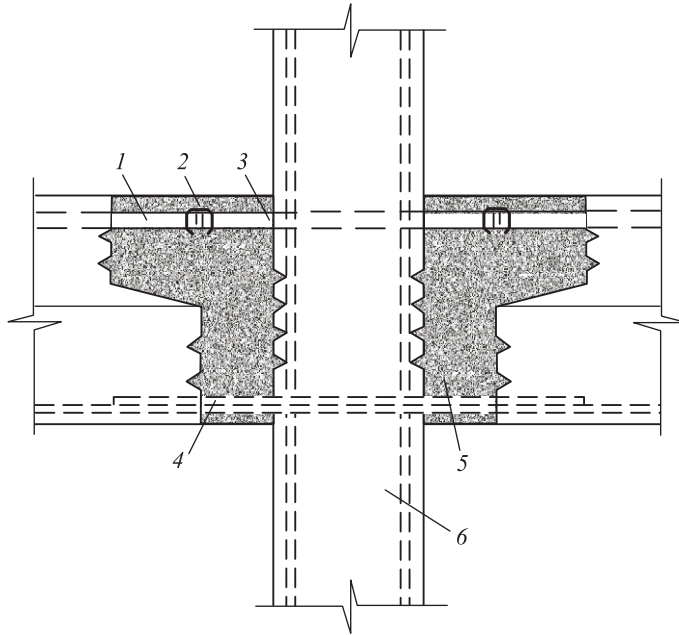


Рис. 3. Рамный узел сопряжения ригеля с колонной с применением сталефибробетона

1 – выпуск продольной арматуры из ригеля; 2 – сварное соединение арматуры; 3 – выпуск продольной арматуры из колонны; 4 – усиленный выпуск арматуры; 5 – сталефибробетон; 6 – колонна

номии проектировщиками назначается заниженный коэффициент K_1^* , учитывающий допускаемые повреждения зданий и сооружений³. В зданиях, с исходно неверно выбранным коэффициент $K_1^* = 0,12$ (вместо 0,35), сейсмические воздействия вызывают весьма значительные разрушения. При проектировании кирпичных зданий, в которых пространственный каркас из монолитных железобетонных сердечников и поясов был заменен на сталефибробетонный (СФЖБ), K_1^* может быть уменьшен в соответствии с эксплуатационными статическими и сейсмическими нагрузками без снижения эксплуатационной надежности. СФБ в элементах сейсмозащиты таких зданий позволяет сократить вес конструкций, упростить технологию их устройства и обеспечить надежную работу на восприятие действующих нагрузок.

Так, расчеты показали, что использование в конструкциях СФЖБ сердечников и поясов взамен традиционных ЖБК при проектировании кирпичного здания казначейства в г. Горно-Алтайске (сейсмичность площадки 8 баллов по шкале MSK) позволило упростить армирование, сократить расход бетона и общий вес монолитных конструкций на 20 %, снизить трудоемкость производства работ на 41 %, а продолжительность работ на 8 % и гарантии пластических деформаций пространственного каркаса из монолитного СФЖБ. Все это при обеспечении эксплуатационных характеристик несущих конструкций здания.

³ СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах СНиП II-7-81* (актуализированного СНиП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах» (СП 14.13330.2011)) (с Изменением N 1) Актуализированная редакция СНиП II-7-81.

Заключение. Применение сталефибробетона в элементах конструкций, их узлах и соединениях повышает эксплуатационную надежность и долговечность гражданских зданий, эксплуатируемых в сейсмоопасных районах, без увеличения их стоимости и трудоемкости производства работ. Программные средства при их проектировании дают возможность разрабатывать конструкции с заданными характеристиками, соответствующими условиям эксплуатации. Такой подход позволяет обеспечивать технико-экономические показатели объектов строительства, превосходящие аналогичные показатели существующих аналогов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А б о в с к и й Н.П., Т е м е р о в а А.С. Современное состояние развития сейсмостойкого строительства // Обзор литературы. Красноярск, 2005. 87 с.
2. Н ь ю м а р к Н.М., Р о з е н б л ю э т Э. Основы сейсмостойкого строительства / Сокр. пер. с англ. Г.Ш. Подольского; под ред. Я.М. Айзенберга. М.: Стройиздат, 1980. 344 с.
3. Б а р ш т е й н М.Ф., Б о р а д о ч е в Н.М. и др. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия. М.: Стройиздат, 1981. 215 с.
4. П о л я к о в В.С., К л и м н и к Л.Ш., Ч е р к а ш и н А.В. Современные методы сейсмозащиты зданий. М.: Стройиздат, 1989. 320 с.
5. А л ь - Ш а м и Я х ь я З а й д. Сталефибробетонные узлы каркасных зданий при действии нагрузок типа сейсмических. Киев, 1987. 21 с.
6. Щ у р В.Ф., Н о в о с е л о в А.П. Исследование эффективности применения сталефибробетона в монолитных узлах железобетонных рам фундаментов под турбоагрегаты // Исследования по строительной механике и механике грунтов. 1977. № 225.
7. Т а л а н т о в а К.В., М и х е е в Н.М. Сталефибробетон и конструкции на его основе. СПб.: ПГУПС, 2014. 276 с.
8. DRAMIX – Bekaert steel fiber for concrete reinforcement. BEKAERT INGRI Flooring Technology. – Electron. data. – Brussels, 2006. Mode of access: www.bekaert.com Title from screen.
9. S w a m y R.N. Fiber – reinforced concrete: mechanics, properties and applications // Indian Concrete Journal. 1974. Vol. 48, No. 1. P. 7–16.
10. П а в л о в А.П. Развитие и экспериментально-теоретические исследования сталефибробетона // Исследования в области железобетонных конструкций: Сб. тр. Л., 1976. № 111. С. 3–13.
11. К у л и к о в А.Н. Экспериментально-теоретические исследования свойств фибробетона при безградиентном напряженном состоянии в кратковременных испытаниях: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1975. 25 с.
12. С у р о в а И.К. Исследование сопротивления фибробетона удару: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1977. 24 с.
13. К о л о у ш е к В. Динамика строительных конструкций / Пер. с чеш. инженеров Г.Д. Рычагова и Г.А. Якушевой; под ред. д-ра техн. наук, проф. А.А. Петропавловского. М.: Стройиздат, 1965. 632 с.

Талантова Клара Васильевна, д-р техн. наук, доц.;

E-mail: talant_bar@mail.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург

Получено после доработки 28.05.18

Talantova Klara Vasilievna, DSc, Ass. Professor; E-mail: talant_bar@mail.ru
Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I, Saint-Petersburg, Russia

DEVELOPMENT OF STEEL FIBER CONCRETE STRUCTURES WITH SPECIFIED CHARACTERISTICS IN BUILDINGS, CONSTRUCTED IN EARTHQUAKE-PRONE REGIONS

The issues of increasing the operational serviceability and safety of buildings constructed in earthquake-prone regions are considered. The requirements to the structural elements, their joints and connections under seismic influences are presented. It is shown that it is possible to preset the properties of structures according to conditions of their operation, using the construction composite – steel fiber concrete, as well as modern software, known in the designing practice (CSC Lira, SCAD, etc.) and specially developed. The results of numerical researches of determination of the rational length and diameter of steel fibers, defining the effectiveness of the selection of their geometry for elements based on steel fiber concrete, exposed to dynamic effects. The software module, with the help of which (according to the results of calculation of CSC SCAD) execute the constructive calculation of joints (with combined reinforcement) of the crossbar with a column and a column with a column is shown. The software module allows determining the rationale zones of forming steel fiber concrete mixes in the joints. At the same time, the characteristics of the steel fiber concrete in joints are set in accordance with the efforts resulting of the calculation on seismic loads.

Key words: earthquake, security of safety and reliability, plastic deformation, energy absorption, steel fiber, steel fiber concrete, steel fiber reinforced concrete, specified properties, software.

REFERENCES

1. Abovskiy N.P., Temerova A.S. Sovremennoe sostoyanie razvitiya seysmostoykogo stroitel'stva [Current state development of aseismic construction]. Obzor literatury [Review of literature]. Krasnoyarsk, 2005. 87 p. (in Russian)
2. Newmark N.M., Rosenbluet E. Osnovy seysmostoykogo stroitel'stva [Fundamentals of earthquake-resistant construction]. Moscow, Stroyizdat, 1980. 344 p. (in Russian)
3. Barshtein M.F., Boradochev N.M. et al. Dinamicheskii raschet sooruzheniy na spetsial'nye vozdeystviya [Dynamic calculation of structures for special effects]. Moscow, Stroyizdat, 1981. 215 p. (in Russian)
4. Polyakov V.S., Klimnik L.Sh., Cherkashin A.V. Sovremennye metody seysmozashchity zdaniy [Modern methods of seismic protection of buildings]. Moscow, Stroyizdat, 1989. 320 p. (in Russian)
5. Al-Shami Yahya Zayd. Stalefibrobetonnye uzly karkasnykh zdaniy pri deystvii nagruzok tipa seysmicheskikh [Steel fiber concrete joints of frame buildings under the action of loads of the seismic type]. Kiev, 1987. 21 p. (in Russian)
6. Shchur V.F., Novoselov A.P. Issledovanie effektivnosti primeneniya stalefibrobetona v monolitnykh uzлах zhelezobetonnykh ram fundamentov pod turboagregaty [Investigation on effectiveness of the applying of the steel-fiber concrete in monolithic nodes of reinforced concrete frames of foundations for turbo-aggregates]. Issledovaniya po stroitel'noy mekhanike i mekhanike gruntov [Research on construction mechanics and soil mechanics]. 1977. No. 225. (in Russian)
7. Talantova K.V., Mikheev N.M. Stalefibrobeton i konstruksii na ego osnove [Steel fiber concrete and structures based on it]. Saint-Petersburg, 2014. 276 p. (in Russian)

8. DRAMIX – Bekaert steel fiber for concrete reinforcement. BEKAERT. INGRI Flooring Technology. Electron. data. Brussels, 2006. Mode of access: www.bekaert.com Title from screen.
 9. S w a m y R.N. Fiber – reinforced concrete: mechanics, properties and applications. Indian Concrete Journal. 1974. Vol. 48, No. 1. Pp. 7–16.
 10. P a v l o v A.P. Razvitie i eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya stalefibrobetona [Development and experimental theoretical studies of steel-fiber concrete]. Issledovaniya v oblasti zhelezobetonnykh konstruktsiy: Sbornik trudov [Research in the field of reinforced concrete structures: Sat. tr]. Leningrad, 1976. No. 111. Pp. 3–13. (in Russian)
 11. K u l i k o v A.N. Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya svoystv fibrobetona pri bezgradientnom napryazhennom sostoyanii v kratkovremennykh ispytaniyakh [Experimental-theoretical studies of the properties of fiber-reinforced concrete in a gradientless stress state in short-term tests]. Leningrad, 1975. 25 p. (in Russian)
 12. S u r o v a I.K. Issledovanie soprotivleniya fibrobetona udaru [Investigation of the resistance of steel fiber reinforced concrete to impact]. Leningrad, 1977. 24 p. (in Russian)
 13. K o l o u s h e k V. Dinamika stroitel'nykh konstruktsiy [Dynamics of building structures]. Moscow, Stroyizdat, 1965. 632 p. (in Russian)
-

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



УДК 628.16.09

**Ю.Л. СКОЛУБОВИЧ, Т.Я. ПАЗЕНКО, А.Ф. КОЛОВА, Е.Л. ВОЙТОВ,
Д.Д. ВОЛКОВ, Е.С. ГОГИНА**

РЕАГЕНТНАЯ ОЧИСТКА ПРОМЫВНЫХ ВОД ФИЛЬТРОВ

Рассмотрена обработка промывочной воды очистных сооружений открытых источников водоснабжения. Приведены результаты экспериментальных исследований по выбору эффективных реагентов очистки и утилизации промывочной воды фильтров. Эффективность осветления отработанных промывных вод фильтров во многом определяется правильным выбором реагентов и оптимальных доз коагулянтов и флокулянтов. Приведены результаты экспериментальных исследований по обработке промывной воды станции водоподготовки г. Красноярска. Планирование экспериментов проведено по методу Бокса–Хантера. Получены аналитические зависимости для определения необходимых доз реагентов. Построены диаграммы для анализа и регулирования режима обработки промывных сточных вод при условии оптимизации рабочих параметров. Осветленная сточная промывная вода после дополнительного фильтрования может быть использована для повторных промывок фильтров, что сократит расходы воды на собственные нужды станции и снизит себестоимость ее очистки.

К л ю ч е в ы е с л о в а: промывные воды фильтров, повторное использование, эффективные реагенты, планирование экспериментов, диаграммы, коагулянты, флокулянты.

В настоящее время действующими нормами и правилами запрещается сброс в водные объекты сточных вод, которые могут быть максимально использованы в системах оборотного и повторного использования после соответствующей очистки и обеззараживания¹. Рациональное использование промывных вод имеет значение и для охраны окружающей среды, и для экономики предприятий, так как при этом возможно увеличение резерва производительности сооружений, снижение расхода питьевой воды на нужды водоподготовительных сооружений и т.д.

В соответствии с существующими рекомендациями промывные воды фильтровальных сооружений на станциях осветления и обезжелезивания воды при одноступенчатом фильтровании рекомендуется отстаивать в от-

¹ СНиП 2.04.02–84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. М., 1985.

© Сколубович Ю.Л., Пазенко Т.Я., Колова А.Ф., Войтов Е.Л., Волков Д.Д., Гогина Е.С., 2018

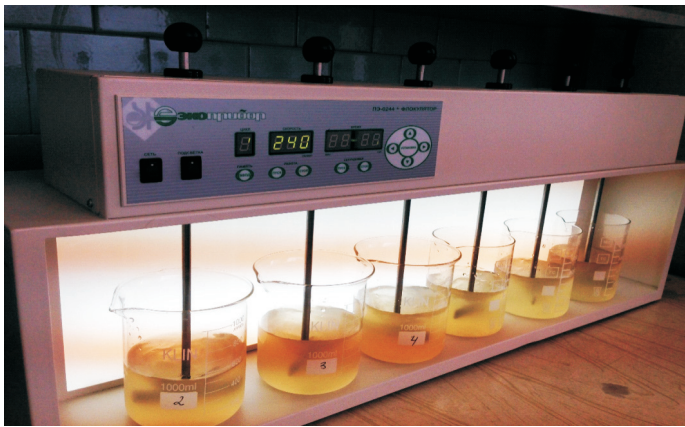


Рис. 1. Флокулятор марки ПЭ-0244 для проведения пробного коагулирования и определения оптимальных доз реагентов

стойниках, рассчитанных на периодическое поступление промывных вод, и равномерно подавать в головной узел очистных сооружений. Допускается также использование очищенной обратной промывной воды для промывки контактных осветлителей [1–4].

Эффективность осветления отработанных промывных вод фильтров во многом определяется правильным выбором реагентов и оптимальных доз коагулянтов и флокулянтов. Экспериментальные исследования по обработке промывной воды фильтров произведены на станции водоподготовки «Гремячий лог» г. Красноярска [5, 6]. Качество отработанной промывной воды фильтров: мутность 72 мг/л; цветность 30 град.; температура 4,0 °С.

В качестве реагентов использовали сульфат алюминия, Аква-Аурат^{ТМ30} и полиалюминия хлорид железа [7].

Таблица 1. Влияние вида коагулянта и флокулянта на эффективность очистки промывной воды

Коагулянты	Флокулянт				
	Праестол	K4041	K4045	K6645	K6651
Сульфат алюминия $Al_2(SO_4)_3$					
остаточная цветность, град.	6,08	3,91	5,64	8,9	4,12
остаточная мутность, мг/л	4,3	6,3	5,3	2,6	2,3
pH	6,65	6,67	6,83	6,74	6,7
Аква-Аурат ^{ТМ30}					
остаточная цветность, град.	6,01	3,29	5,94	5,73	3,6
остаточная мутность, мг/л	3,2	3,9	3,8	1,48	1,3
pH	7,13	7,18	7,18	7,12	7,1
Полиалюминия хлорид железа					
остаточная цветность, град.	9,33	6,51	6,08	5,86	5,21
остаточная мутность, мг/л	3,9	2,4	2,25	2,4	1,8
pH	7,52	7,57	7,52	7,49	7,65

Для улучшения процесса хлопьеобразования при коагуляции в воду вводили:

- традиционный флокулянт Праестол 2515;
- флокулянты анионного типа со средней степенью ионного заряда, высокой молекулярной массой К4041 и К4045 и высокой степенью ионного заряда.

Эксперимент проводился на промывной воде, отобранной равномерно в течение всего времени промывки фильтров. Пробы объемом 500 мл обрабатывались коагулянтами в дозе 5 мг/л на флокуляторе марки ПЭ-0244 (рис. 1). Скорость перемешивания пробы с коагулянтом составляла в первые 2 мин 240 об./мин, в последующие 2 мин – 60 об./мин. После первых 2 мин перемешивания в воду вводили флокулянт в дозе 0,2 мг/л. Затем после 2-часового отстаивания в пробах определяли мутность, цветность и рН (табл. 1).

Из анализа табл. 1 и визуальных наблюдений за процессом отстаивания сделан вывод, что в пробе, обработанной сульфатом алюминия и флокулянтом К4045, процесс хлопьеобразования начинался быстрее по сравнению с пробами, обработанными другими флокулянтами. В пробах, обработанных флокулянтами К4045, К6645 и К6651, были крупные и хорошо осаждаемые хлопья.

Таблица 2. Факторы и уровни их варьирования

Фактор	Интервал	+1	0	–1
X_1	2	7	5	3
X_2	0,1	0,6	0,5	0,4
X_3	0,5	7,5	7	6,5

Таблица 3. Матрица планирования эксперимента

Опыт, №	0	1	2	3	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1 X_2 X_3$	Y_1	Y_2	Y_3
1	+1	–1	–1	–1	+1	+1	+1	–1	1,3	8,25	7,45
2	+1	+1	–1	–1	–1	–1	+1	+1	2,5	9,55	7,43
3	+1	–1	+1	–1	–1	+1	–1	+1	3,3	8,68	7,43
4	+1	+1	+1	–1	+1	–1	–1	–1	3,4	8,25	7,3
5	+1	–1	–1	+1	+1	–1	–1	+1	–	9,11	7,35
6	+1	+1	–1	+1	–1	+1	–1	–1	–	8,25	7,26
7	+1	–1	+1	+1	–1	–1	+1	–1	1,2	8,46	7,49
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	2,9	9,55	7,25
9	+1	–1	–1	+1	0	0	0	0	3,0	8,46	7,36
10	+1	+1	–1	+1	0	0	0	0	1,5	8,33	7,33
11	+1	–1	+1	+1	0	0	0	0	0,9	8,9	7,36
12	+1	+1	+1	+1	0	0	0	0	1,8	8,46	7,35

Примечание. Число опытов в матрице планирования при $K = 3$ равно 12. В качестве наиболее значимых варьируемых факторов были приняты:

X_1 – доза коагулянта Аква-Аурат^{TM30}, мг/дм³; X_2 – доза флокулянта К4041, мг/дм³; X_3 – величина рН.

В число оценочных критериев были включены: Y_1 – остаточная концентрация взвешенных веществ, мг/дм³; Y_2 – цветность, град.; Y_3 – рН воды после обработки.

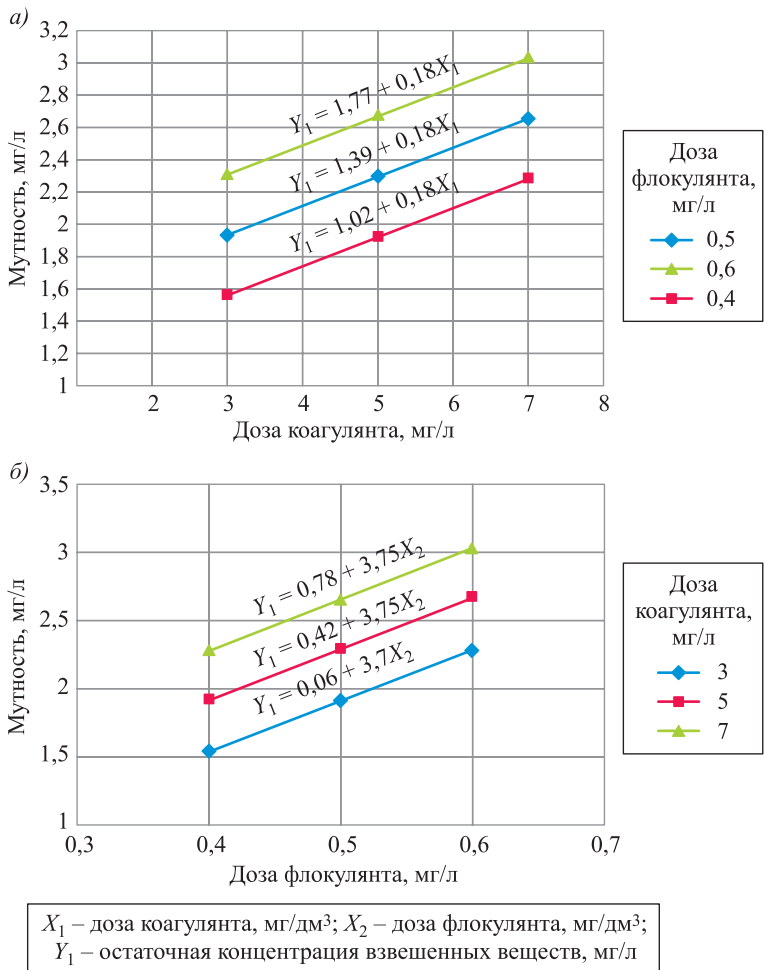


Рис. 2. Зависимости остаточной концентрации взвешенных веществ от дозы коагулянта (а) и флокулянта (б)

В пробах, обработанных коагулянтом полиалюминия хлорид железа, лучшее осветление наблюдалось при использовании флокулянта Праестол.

При обработке вод коагулянтом Аква-Аурат^{ТМ30} высокая степень осветления отмечена с применением всех флокулянтов, но наибольшая эффективность по мутности достигалась с помощью анионного флокулянта К4041, по цветности – катионного флокулянта К6651. При этом было обеспечено питьевое качество осветленной воды по мутности и цветности². Однако использование такой воды для повторных промывок фильтров согласно нормам требует дополнительного фильтрования¹.

Для обоснования основных технологических параметров процесса очистки промывных сточных вод средней мутности поставлен плановый экспе-

² СанПин 2.1.4.1074–01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2002. 103 с.

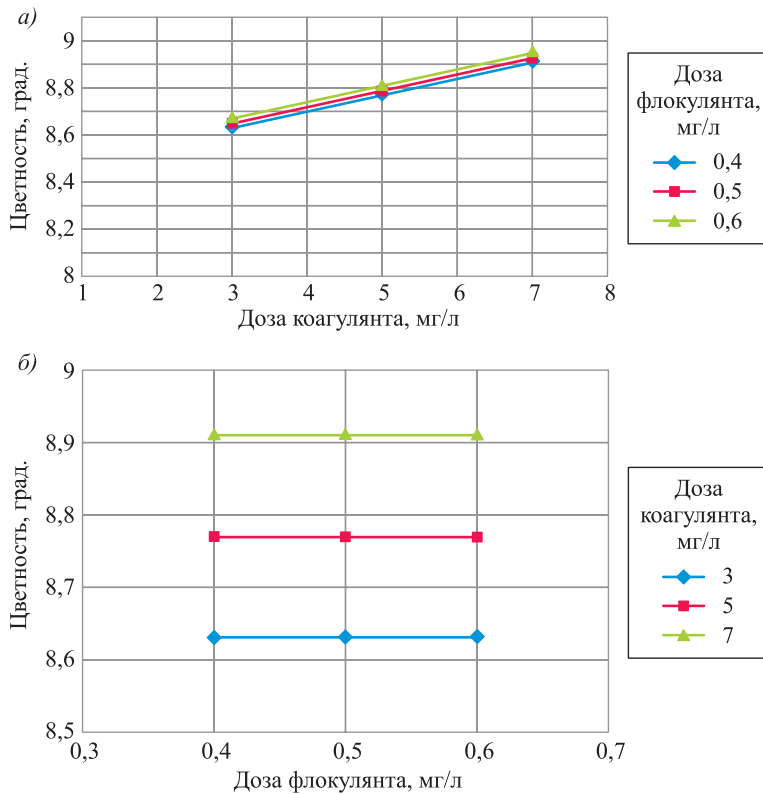


Рис. 3. Зависимости цветности от дозы коагулянта (а) и флокулянта (б)

римент с использованием коагулянта Аква-Аурат^{ТМ30} и флокулянта К4041. Планирование эксперимента проведено по методу Бокса–Хантера [8, 9]. Факторы и уровни их варьирования были выбраны на основе предварительных исследований (табл. 2).

Матрица планирования эксперимента обработки промывных сточных вод приведена в табл. 3.

При обработке экспериментальных данных были получены уравнения регрессии, позволяющие определить влияние отдельных факторов и степень их взаимодействия. Адекватность уравнений проверялась по критерию Фишера.

Уравнение регрессии по остаточной концентрации взвешенных веществ (мг/дм³) имеет следующий вид

$$Y_1 = 2,325 + 0,375X_1 + 0,375X_2 - 0,35X_2X_3. \quad (1)$$

Уравнение регрессии по цветности обработанной воды (град.) имеет вид

$$Y_2 = 8,76 + 0,137X_1 + 0,19X_2X_3 + 0,46X_1X_2X_3. \quad (2)$$

Как видно из уравнения (1), доза коагулянта и доза флокулянта влияют на процесс очистки одинаково, а на цветность (уравнение (2)) обработанной воды в большей степени оказывает влияние доза коагулянта Аква-Аурат^{ТМ30}.

Уравнения регрессии были приведены к натуральному виду и установлены графические зависимости для определения необходимых доз реагентов, позволяющих получить требуемое качество осветляемой воды (рис. 2).

Как видно из рис. 3, с увеличением дозы коагулянта и флокулянта возрастает и концентрация взвешенных веществ в очищенной воде. На цветность воды оказывает влияние в большей степени доза коагулянта.

Полученные уравнения регрессии были оптимизированы диссоциативно-шаговым методом, основанном на математическом анализе простых функций, на которые диссоциируется исследуемая модель с дальнейшим шаговым приближением к оптимальным значениям функции, что дает возможность получить информацию в технико-экономических показателях при анализе полиномиальных моделей [10]. Ранжируя значения параметров выхода U_1 , U_2 , получены диаграммы, позволяющие определить области совместной оптимальности.

После обработки уравнений диссоциативно-шаговым методом в программе MateLabе были разработаны графические зависимости для получения области совместной оптимальности.

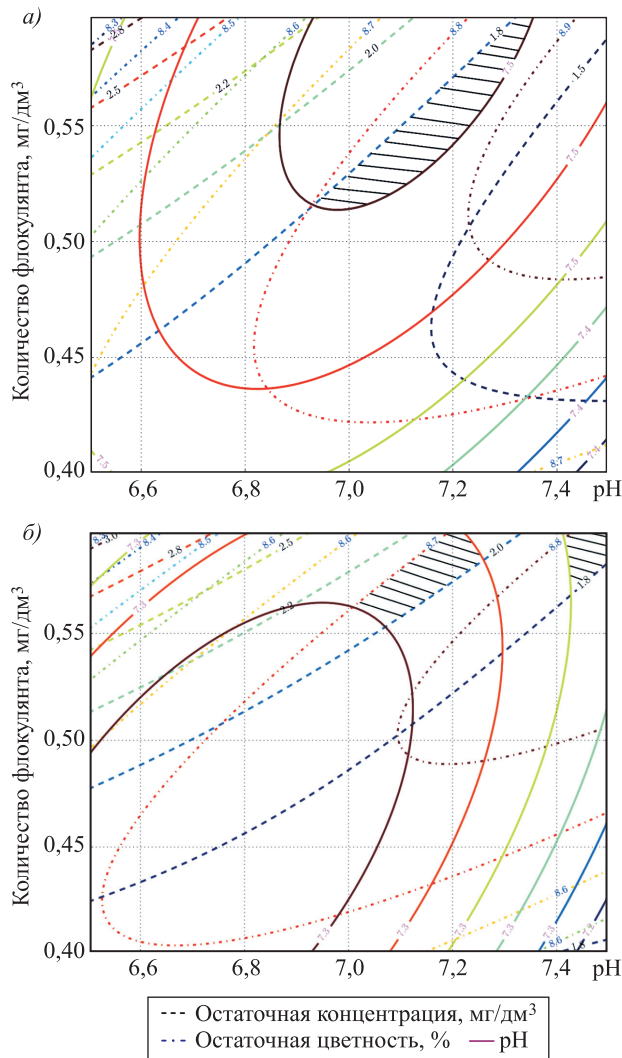


Рис. 4. Выходные параметры при количестве коагулянта 3 мг/дм³ (а) и 5 мг/дм³ (б)

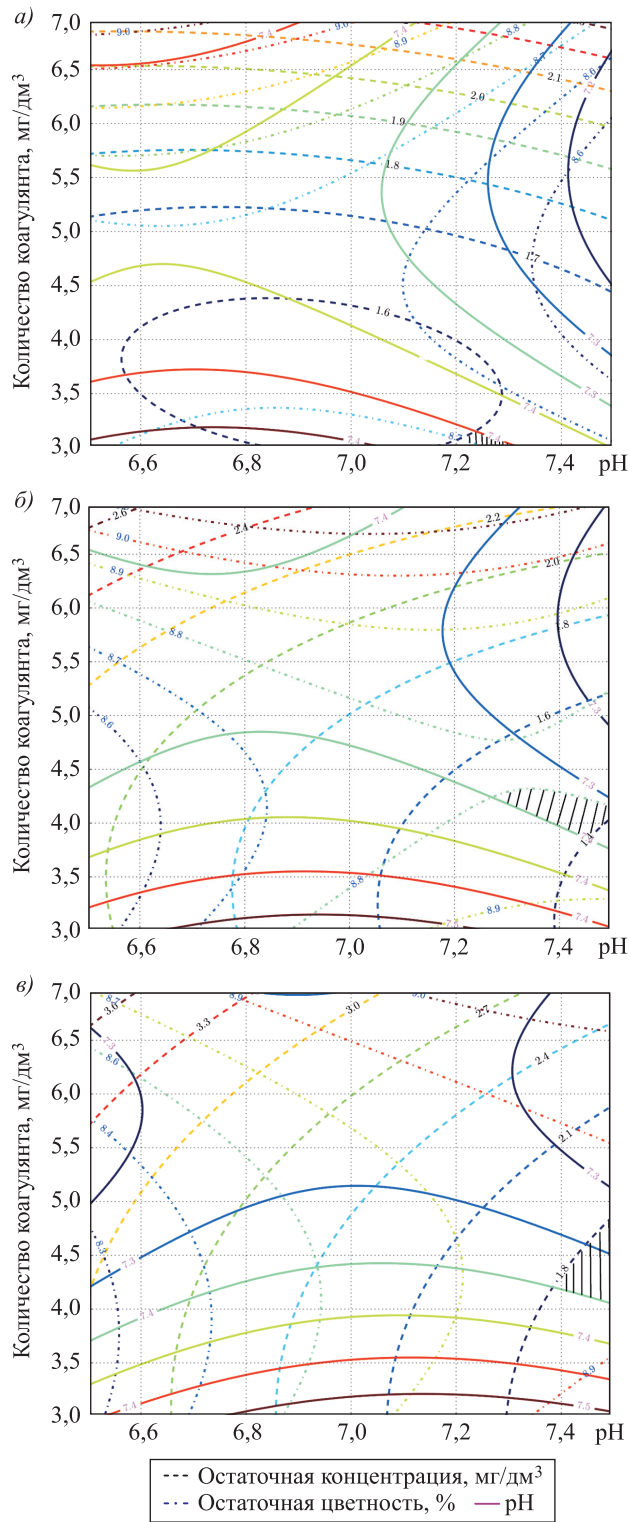


Рис. 5. Выходные параметры при дозе флокулянта 0,4 мг/дм³ (а), 0,5 (б) и 0,6 мг/дм³ (в)

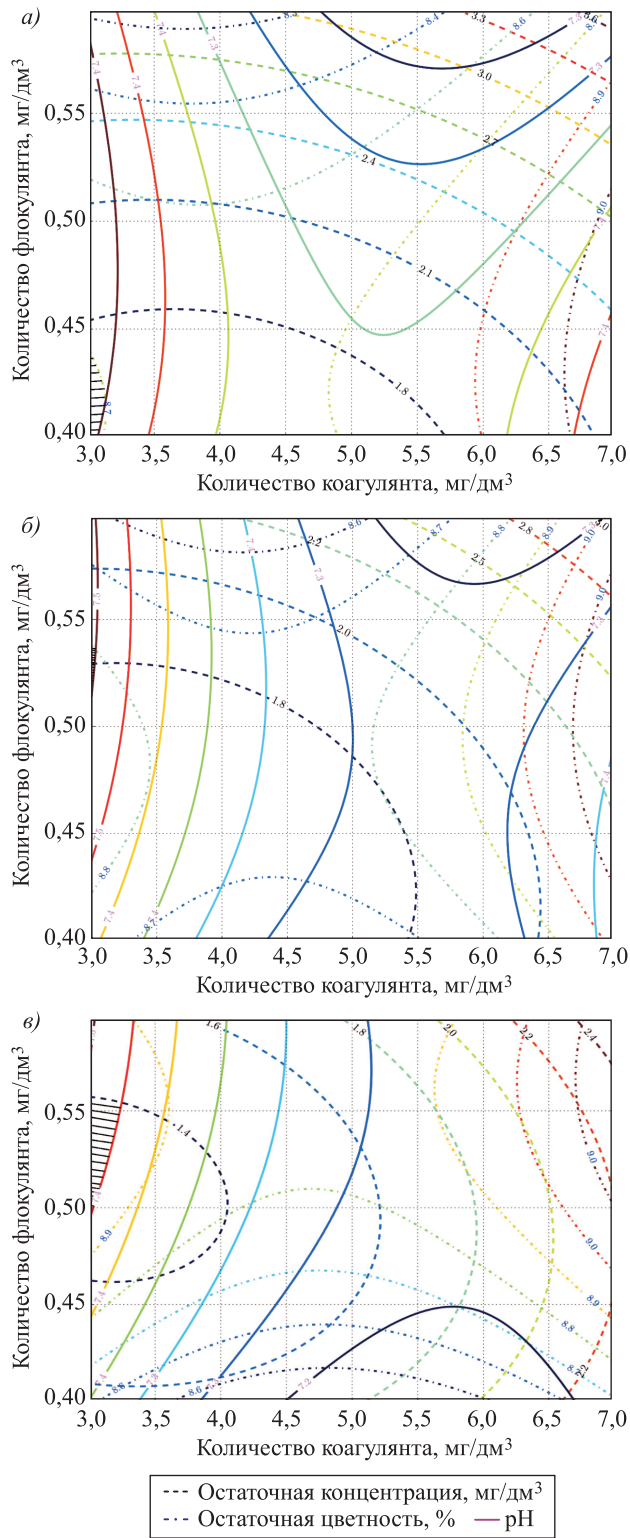


Рис. 6. Выходные параметры при pH = 6,5 (а), pH = 7,0 (б) и pH = 7,5 (в)

На рис. 4 представлены диаграммы для регулирования режима обработки промывных стоков при условии оптимизации дозы коагулянта.

Как видно из рис. 4, с увеличением дозы коагулянта область совместной оптимальности смещается в сторону повышения pH, раствор становится более щелочным.

На рис. 5 приведены диаграммы для регулирования режима обработки промывных стоков при условии оптимизации дозы флокулянта.

С увеличением дозы флокулянта область совместной оптимальности смещается в сторону повышения дозы коагулянта.

На рис. 6 представлены диаграммы для регулирования режима обработки промывных стоков при условии оптимизации pH.

Из рис. 6 следует, что с повышением pH область совместной оптимальности смещается в сторону увеличения дозы флокулянта.

Максимальный эффект очистки отработанных промывных вод фильтров достигается при совместном использовании коагулянта Аква-Аурат^{ТМ30} и флокулянтов K4041 или K6651.

Выводы. Установлены аналитические зависимости для определения необходимых доз реагентов, позволяющих получить требуемое качество осветляемой воды. Построены диаграммы для анализа и регулирования режима обработки промывных сточных вод при условии оптимизации рабочих параметров.

Осветленная сточная промывная вода после дополнительной очистки фильтрованием может быть использована для повторных промывок фильтров с целью сокращения расходов воды на собственные нужды станции и снижения себестоимости ее очистки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сколубович Ю.Л., Войтов Е.Л., Никитин А.М. Повышение эффективности работы водопроводных станций // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. № 2. С. 21–25.
2. Драгинский В.Л., Алексеева Л.П. Обработка промывных вод фильтров водоочистой станции // Водоснабжение и санитарная техника. 2005. № 8. С. 25–31.
3. Урванцева М.И., Артеменок Н.Д. Комплексная оценка процессов очистки промывных вод водопроводных станций в Западной Сибири // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. № 2. С. 25–29.
4. Быкова П.Г., Стрелков А.К., Занина Ж.В., Занин М.А., Поняева А.П. Повторное использование воды от промывки фильтров // Водоснабжение и санитарная техника. 2015. № 12. С. 14–17.
5. Пазенко Т.Я., Колова А.Ф. Обработка промывных вод фильтров водоподготовки // Изв. вузов. Строительство. 2010. № 9. С. 65–68.
6. Матюшенко А.И., Миронова О.В., Пазенко Т.Я., Колова А.Ф. Исследования по выбору типа коагулянта на водозаборе «Гремячий лог» г. Красноярска // Вестн. ИрГТУ. 2012. № 5. С. 129–134.
7. Линевич С.Н., Гетманцев С.В. Современные и перспективные методы и технологии кондиционирования природных вод в водоснабжении. М., 2013. 323 с.
8. Батрак А.П. Планирование и организация эксперимента: Учеб. пособие. Красноярск: ИПЦ СФУ, 2010. 60 с.

9. А х н а з а р о в а С.Л., Ка ф а р о в В.В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии. М.: Высш. шк., 1978. С. 99–114.
10. Вознесенский В.А., Ковальчук А.Ф. Принятие решений по статистическим моделям. М.: Статистика, 1978. 192 с.

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

E-mail: skolubovich@sibstrin.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Пазенко Татьяна Яковлевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: pazenkotat@yadex.ru

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Колова Алевтина Фаизовна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: kolova@yadex.ru

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Войтов Евгений Леонидович, д-р техн. наук, доц.; E-mail: voitovel@ya.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Волков Дмитрий Дмитриевич, зам. ген. директора

ОАО «Северо-Кузбасская энергетическая компания», г. Кемерово

Гогина Елена Сергеевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: kanz@mgsu.ru

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Получено 16.05.18

Skolubovich Yuriy Leonidovich, DSc, Professor; E-mail: skolubovich@sibstrin.ru

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

Pazenko Tatyana Yakovlevna, PhD, Ass. Professor;

E-mail: pazenkotat@yadex.ru

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Kolova Alevtina Faizovna, PhD, Ass. Professor;

E-mail: kolova@yadex.ru

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Voytov Evgeniy Leonidovich, DSc, Ass. Professor; E-mail: voitovel@ya.ru

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

Volkov Dmitriy Dmitrievich, deputy general director

Severo-Kuzbass Power Company, Kemerovo, Russia

Gogina Elena Sergeevna, PhD, Ass. Professor; E-mail: kanz@mgsu.ru

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

REAGENT PURIFICATION OF WASHING FILTERS

The treatment of washing water of treatment facilities of open water sources is considered. The results of experimental studies on the selection of effective reagents, cleaning and utilization of filter washing water are presented. The effectiveness of clarification of waste wash water filters is largely determined by the correct choice of reagents and the determination of optimal doses of coagulants and flocculants. The results of experimental studies on the treatment of washing water of a water treatment plant in Krasnoyarsk are presented. The experiments were planned using the Box–Hunter method. Analytical dependencies are obtained to determine the required doses of reagents. The diagrams for the analysis and regulation of the treatment regime for washing wastewater are constructed under the condition that the operating parameters are optimized. Clarified sewage water after additional filtration can be used for repeated washing of filters, reducing water consumption for own needs of the plant and reducing the cost of cleaning it.

Key words: filter washings, reuse, effective reagents, experiment planning, diagrams, coagulants, flocculants.

REFERENCES

1. Skolubovich Yu.L., Voytov E.L., Nikitin A.M. Povyshenie effektivnosti raboty vodoprovodnykh stantsiy [Increase of efficiency of waterworks]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary engineering]. 2011. No. 2. Pp. 21–25. (in Russian)
2. Draginskiy V.L., Alekseeva L.P. Obrabotka promyvnykh vod fil'trov vodoochistnoy stantsii [Treatment of washing waters of water treatment plant filters]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary engineering]. 2005. No. 8. Pp. 25–31. (in Russian)
3. Urvantseva M.I., Artemenok N.D. Kompleksnaya otsenka protsessov oчитки promyvnykh vod vodoprovodnykh stantsiy v Zapadnoy Sibiri [Complex evaluation of cleaning processes for washing water of waterworks in Western Siberia]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary engineering]. 2011. No. 2. Pp. 25–29. (in Russian)
4. Bykova P.G., Strelkov A.K., Zanina Zh.V., Zanin M.A., Ponyaeva A.P. Povtornoё ispol'zovanie vody ot promyvki fil'trov [Reuse of water from filter washing]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary engineering]. 2015. No. 12. Pp. 14–17. (in Russian)
5. Pazenko T.Ya., Kolova A.F. Obrabotka promyvnykh vod fil'trov vodopodgotovki [Treatment of the sconrage of water condifioning filters]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2010. No. 9. Pp. 65–68. (in Russian)
6. Matyushenko A.I., Mironova O.V., Pazenko T.Ya., Kolova A.F. Issledovaniya po vyboru tipa koagulyanta na vodozabore «Gremyachiy log» g. Krasnoyarska [Studies on the choice of the type of coagulant at the water intake “Gremyachy Log”, Krasnoyarsk]. Vestnik IrGTU [Bull. Irkutsk State Technical University]. 2012. No. 5. Pp. 129–134. (in Russian)
7. Linevich S.N., Getmantsev S.V. Sovremennyye i perspektivnyye metody i tekhnologii konditsionirovaniya prirodnykh vod v vodosnabzhenii [Modern and promising methods and technologies for conditioning natural water in water supply]. Moscow, 2013. 323 p. (in Russian)
8. Batrak A.P. Planirovaniye i organizatsiya eksperimenta: Uchebnoye posobie [Planning and organization of the experiment: A manual]. Krasnoyarsk: CPI SFU, 2010. 60 p. (in Russian)
9. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. Optimizatsiya eksperimenta v khimii i khimicheskoy tekhnologii [Optimization of the experiment in chemistry and chemical technology]. Moscow, 1978. Pp. 99–114. (in Russian)
10. Voznesenskiy V.A., Koval'chuk A.F. Prinyatie resheniy po statisticheskim modelyam [Decision-making on statistical models]. Moscow, 1978. 192 p. (in Russian)

УДК 628.161

Е.Д. ХЕЦУРИАНИ, В.Л. БОНДАРЕНКО

**ВОДОЗАБОРНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ
В СОСТАВЕ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
МНОГОЦЕЛЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

Целью исследований являются водозаборные технологические комплексы (ВТК), включающие в себя водозаборный ковш с комплексом различных гидротехнических сооружений и защитных устройств в составе специализированного типа природно-технических систем «Природная водная среда–водозаборный технологический комплекс–система многоцелевого водоснабжения» (ПВС–ВТК–СМВ), которые выступают многоцелевыми техногенными компонентами, обеспечивающими отбор расчетных расходов воды из водного объекта, именуемого в дальнейшем как ПВС, с обеспечением нормативных требований экологической безопасности (ЭБ) в зонах влияния. Границы зоны влияния ВТК в пределах водного объекта и СМВ определяются на основе результатов комплексных натурных и лабораторных исследований. Оценка влияния конструктивных элементов ВТК на уровень защищенности ПВС по сохранению биоразнообразия ихтиофауны и флоры в водном объекте и жизненно важных интересов проживающего населения СМВ городского хозяйства вызвала необходимость в обосновании доминирующих экологических факторов, определяющих базовые критериальные показатели ЭБ в зонах влияния ВТК. На основе результатов мониторинговых исследований экологического состояния в зонах влияния ВТК, размещаемых на участке нижнего течения от Цимлянского водохранилища до устья р. Дон, используемых конструктивных решений на водозаборных устройствах, уровня защищенности ПВС по сохранению биоразнообразия ихтиофауны и флоры в водном объекте и защите жизненно важных интересов проживающего населения в городах и населенных пунктах, для количественной оценки ЭБ потребовалась разработка критериев безопасности.

К л ю ч е в ы е с л о в а: система, экологическая безопасность, водозаборный технологический комплекс, критерий экологической безопасности, водный объект, система многоцелевого водоснабжения городского хозяйства.

Водозаборный технологический комплекс (ВТК) в составе природно-технической системы (ПТС) «природная водная среда–водозаборный технологический комплекс–система многоцелевого водоснабжения» (ПВС–ВТК–СМВ) – важное звено СМВ городских хозяйств. Занимая головное положение в СМВ, ВТК выполняет важную функциональную роль по снабжению населения и различных предприятий городского хозяйства необходимым количеством питьевой воды нормативного качества, с одной стороны, а с другой – отвечает современным требованиям по обеспечению экологической безопасности (ЭБ) в зонах влияния ВТК.

Результаты исследований по оценке эффективности работы водозаборных сооружений и различных устройств выявили недостаточную функциональную эффективность защиты от попадания молоди рыб, водной растительности, шуги, планктона и плавающих предметов в водозаборный ковш.

© Хецуриани Е.Д., Бондаренко В.Л., 2018

В акватории водозаборных ковшей в теплые периоды года интенсивно развиваются цианобактерии – синезеленые водоросли – источники токсичного загрязнения воды, поступающей на очистные сооружения технологической системы водоподготовки для использования в СМВ городских хозяйств.

Донные и взвешенные наносы из водного объекта, попадающие в водозаборный ковш, снижают эффективность его работы, а также технологической системы водоподготовки в СМВ. Весьма негативным экологическим фактором в технологических трубопроводах системы водоподготовки является дрейссена, которая закрепляется на внутренней поверхности напорных трубопроводов и значительно снижает их пропускную способность, что вызывает необходимость в защите от этого явления. В зимний период эксплуатации требуются защитные конструктивные мероприятия от ледостава. Для обеспечения отбора расчетных расходов воды из водного объекта необходимо учитывать процессы переформирования русла реки под воздействием ВТК.

Анализ результатов исследования функциональной и экологической эффективности действующих ВТК определил важность и необходимость разработки базовых критериев безопасности как показателей ЭБ. Предметом исследований являются ВТК, действующие в составе ПТС «ПВС–ВТК–СМВ», взаимосвязь, взаимодействие и взаимоотношения (ВВВ) которых с экологическими факторами по обеспечению сохранения биоразнообразия в водном объекте, защиты СМВ от токсичных синезеленых водорослей и дрейссены определяют ЭБ в зонах влияния ВТК.

Область исследований – показатели ЭБ специализированного типа ПТС «ПВС–ВТК–СМВ», где центральным техногенным компонентом является ВТК, и под ВВВ которого с ПВС водного объекта и СМВ городского хозяйства в пространстве и времени формируется уровень ЭБ по сохранению биоразнообразия ихтиофауны и флоры в водном объекте, обеспечению потребностей населения в питьевой воде нормативного качества и технического водоснабжения промышленных предприятий, ТЭС, АЭС, ГРЭС и других расчетными расходами воды [1, 2].

Исследованиями установлено, что системная ВВВ ВТК с природным компонентом ПВС в зонах влияния на водном объекте и СМВ в ПТС «ПВС–ВТК–СМВ» определяет собой многоцелевую функциональность его по обеспечению ЭБ по следующим критериальным показателям:

- защита водозаборного ковша от попадания молоди рыб, дрейссены и водной растительности при отборе расчетных расходов воды; взвешенных и донных наносов из водного объекта как водоисточника СМВ; шуги и плавающих предметов;
- защита акватории водозаборного ковша от процессов возникновения и развития цианобактерий как источника токсичного загрязнения воды, поступающих на очистные сооружения технологической системы подготовки воды для использования в СМВ городского хозяйства;
- защита технологической системы отбора воды из акватории ковша на отстойные сооружения СМВ от негативного воздействия дрейссены на пропускную способность водопроводящих трубопроводов;
- защита водозаборного сооружения от ледостава;

– оценка воздействия ВТК на руслоформирующие процессы в зонах его влияния на водном объекте.

В зонах влияния ВТК ЭБ определяется количественными и качественными критериальными показателями, на основании которых производится оценка уровня защищенности ПВС и СМВ от негативного воздействия техногенного компонента. По функциональной значимости критериальные показатели, как установлено исследованиями, обуславливаются определенной иерархичностью и количественно выражаются процентным отношением к желаемому нормативно-допустимому значению уровня ЭБ в зонах влияния ВТК [2, 4].

На основе результатов исследований на действующих ВТК в нижнем течении р. Дон определены в следующей иерархической последовательности базовые критериальные показатели:

– уровня защищенности по сохранению природного биоразнообразия ихтиофауны и флоры (молоди рыб и водной растительности) в ПВС, который должен составлять не менее 70–80 %;

– уровня защищенности акватории водозаборного ковша от шуги и плавающих предметов, поступающих из водного объекта – не менее 70–80 %;

– уровня защищенности акватории водозаборного ковша от донных и взвешенных наносов – соответственно 90–95 и 70–80 %;

– защиты акватории водозаборного ковша от синезеленых водорослей, по требованиям СанПиН – не менее 95–97 %;

– защиты технологической системы водоподготовки от дрейссены напорных трубопроводов – не менее 90–95 %;

– защиты ВТК от ледостава – не менее 98 %;

– воздействия ВТК на руслоформирующие процессы в зоне влияния, который определяется качественно на физических моделях в масштабе не менее 1:100.

Каждый критериальный показатель устанавливается количественно или качественно, что требует индивидуальных экспериментов, связанных с разработкой новых или совершенствованием существующих конструктивных решений с проведением специальных биологических, гидрохимических исследований водной ихтиофауны и растительности.

ВТК как открытая неравновесная система, в которой взаимосвязаны между собой составляющие его функциональные элементы от создаваемого водозаборного окна до комплекса отстойных сооружений, должна обеспечивать ЭБ и необходимые технологические условия водоподготовки для СМВ городского хозяйства. Следует отметить, что в такой постановке задача является весьма сложной, но требующей своего решения.

С помощью системного подхода на основе результатов системного анализа процессов ВВВ между составляющими функциональными элементами ВТК было установлено, что для защиты водозаборного ковша от попадания молоди рыб, донных и взвешенных наносов, водной растительности и шуги необходимы принципиально новые конструктивные решения с использованием отечественного опыта в решении подобных задач. Анализ опыта создания и применения новых конструктивных решений с использованием высокопрочных синтетических тканевых материалов показал высокую эффективность защиты молоди рыб от попадания в аванкамеры водозаборных

сооружений производительностью до 200 м³/с систем технического водоснабжения ТЭС, АЭС, а также водозаборных сооружений производительностью до 50 м³/с [3–5].

Для решаемых задач по обеспечению ЭБ на действующих и создаваемых ВТК в составе ПТС «ПВС–ВТК–СМВ» отечественный опыт использования мягких наплавных конструкций (МНК), выполняемых из высокопрочных синтетических тканевых материалов, может в полной мере быть применен для ВТК, производительность водозаборных сооружений которых составляет не более 10 м³/с [6–11].

МНК водозаборного сооружения (рис. 1) представляет собой систему поверхностных поплавков, к которым крепится вертикальное тканевое полотно расчетного периметра, нижняя кромка которого крепится к донным якорным устройствам через систему заглубленных поплавков и обеспечивает расчетную высоту водозаборного окна постоянного размера и соответственно экологически приемлемую расчетную скорость водного потока ($V = 0,1$ м/с), обеспечивающего снижение попадания поверхностных видов молоди рыб в систему использования водных ресурсов.

Для защиты от попадания донных видов рыб перед водозаборным окном МНК-В устанавливается МНК-Д в виде донного порога, нижняя кромка которого крепится к якорным устройствам, а верхняя кромка к системе заглубленных поплавков, которые в свою очередь через систему гибких оттяжек крепятся к якорным устройствам.

Функциональное взаимодействие МНК-В и МНК-Д между собой и водной средой обеспечивает решение ряда задач, из которых наиболее важными являются защита от попадания в водозаборный ковш молоди рыб, дрейссены, водной растительности, донных и взвешенных наносов, шуги и плавающих предметов.

Защита СМВ от синезеленых водорослей в акватории водозаборного ковша может осуществляться путем использования так называемых «ершей», которые выполняют роль поверхностей для закрепления цианобактерий. Функционально и конструктивно «ерши» создают достаточно большую поверхность для закрепления естественных биоценозов, находящихся

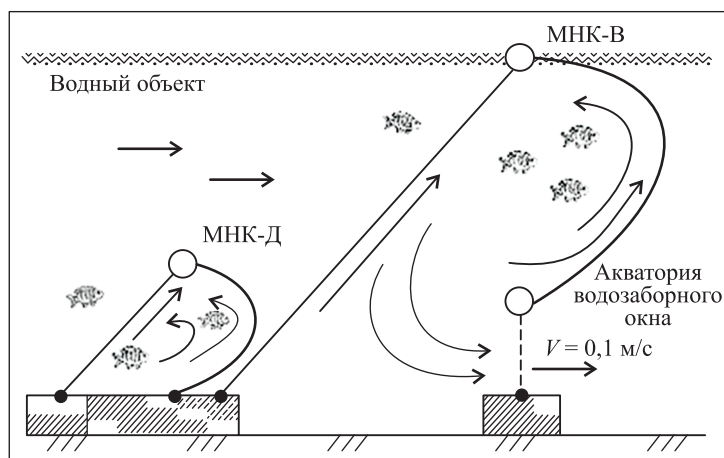


Рис. 1. Конструктивная схема МНК-В и МНК-Д в голове водозаборного ковша

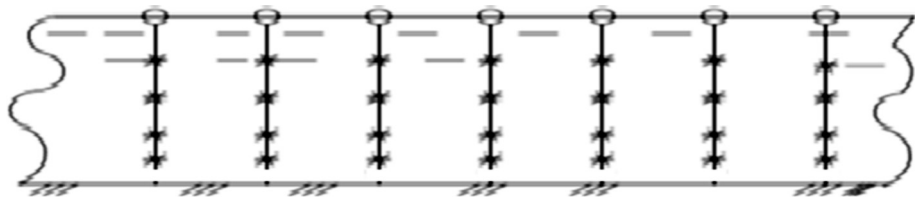


Рис. 2. Схема размещения «ершей» в акватории водозаборного ковша

в водной среде водозаборного ковша [6–11]. В конструктивном исполнении «ерши» представляют собой основу для закрепления естественных биоценозов водной среды, которые улавливают и уничтожают синезеленые водоросли в акватории водозаборного ковша (рис. 2).

«Ерши» в акватории водозаборного ковша рекомендуется устанавливать на водной поверхности, занимая 70–80 % ее акватории (рис. 3). Использование «ершей» носит сезонный характер – весенне-летний период, когда наблюдается интенсивное развитие синезеленых водорослей. В конце лета на поверхностях «ершей» накапливается значительное количество биомассы,

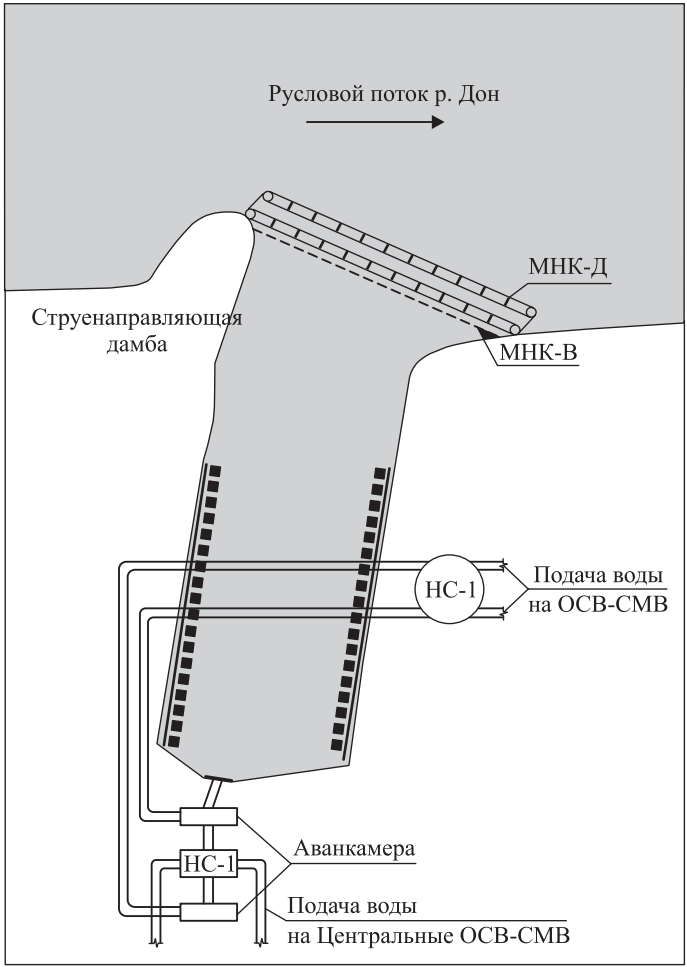


Рис. 3. Плановое расположение водозаборного ковша СМВ городов Ростов-на-Дону, Аксай, Батайск

которая является хорошим кормом для молоди рыб, выращиваемой на действующих рыбозаводах.

На основе результатов анализа функциональной работы ВТК в составе ПТС «ПВС–ВТК–СМВ» было установлено, что в технологической системе напорных водоводов действующих насосных станций наблюдаются процессы зарастания внутренних поверхностей труб дрейссеной, что снижает их пропускную способность и увеличивает расход электрической энергии для подачи воды на очистные сооружения водоподготовки СМВ. Для защиты напорных трубопроводов от дрейссены предлагается электрогидроударный способ.

Функциональная работа ВТК в составе ПТС «ПВС–ВТК–СМВ», как открытой неравновесной системы, обеспечивается непрерывным поступлением потоков вещества в виде расчетных расходов воды, отбираемых из водного объекта, кинетической и потенциальной энергии водного потока и солнечной радиации, информации, содержащейся в русловом потоке воды, которая формируется в пределах бассейновой геосистемы. Отбор расчетного расхода воды из водного объекта – природного компонента ПВС осуществляется техногенными компонентами ВТК, который должен обеспечивать устойчивую работу СМВ и ЭБ в зонах своего влияния. Системная ВВВ между природными компонентами ПВС и техногенными компонентами ВТК и СМВ, с одной стороны, обеспечивает необходимые потребности городского хозяйства в воде нормативного качества, а с другой – ЭБ в зонах влияния ВТК как центрального главного техногенного компонента [7–11].

Обеспечение ЭБ в зонах влияния ВТК, функционирующего в составе ПТС «ПВС–ВТК–СМВ», по установленным семи основным критериальным показателям определило необходимость в обосновании приемлемых основ методологии на базе системного подхода [10]. На основе результатов исследований процессов ВВВ конструктивных элементов между собой (см. рис. 1–3) была установлена их иерархия функциональной значимости в ВТК. Так, МНК-В водозаборного устройства (см. рис. 1), являясь многофункциональной, взаимодействует с ПВС водного объекта. Функциональное взаимодействие МНК-В с ПВС способствует сохранению биологического разнообразия в водном объекте путем защиты молоди рыб, водной растительности, исключая попадание в водозаборный ковш шуги, плавающих предметов. МНК-Д при взаимодействии с донными слоями водного потока ПВС обеспечивает отвод от водозаборного окна МНК-В донных видов рыб и влекомых донных наносов. В совокупности два конструктивных элемента защищают водозаборный ковш по трем наиболее важным критериальным показателям, которые создают до 65 % ЭБ ВТК.

На четвертом иерархическом уровне функциональной значимости находится критериальный показатель защиты акватории водозаборного ковша от синезеленых водорослей, поступающих в СМВ городского хозяйства. Защита СМВ от токсичных микроорганизмов обеспечивает ЭБ ВТК в пределах 20 %.

Пятый иерархический уровень функциональной значимости занимает критериальный показатель защиты технологической системы отбора расчетных расходов воды из водозаборного ковша в СМВ от негативного воздейст-

вия дрейссены на пропускную способность напорных трубопроводов. Защита от дрейссены трубопроводов обеспечивает ЭБ до 10 %.

На шестом иерархическом уровне функциональной значимости стоит критериальный показатель защиты МНК-В от ледостава в осенне-зимний период эксплуатации ВТК, который обеспечивает ЭБ в пределах 4 %.

Седьмой иерархический уровень функциональной значимости представляет критериальный показатель воздействия руслоформирующих процессов на водном объекте на функциональную работу ВТК и соответственно влияет на ЭБ в пределах 1 % [8].

На основе системного анализа и синтеза результатов исследований процессов ВВВ конструктивных элементов ВТК с ПВС и СМВ были обоснованы их критериальные показатели ЭБ и сформулировано базовое понятие ЭБ ВТК в составе специализированного типа ПТС «ПВС–ВТК–СМВ».

Результаты исследований на действующих ВТК в составе ПТС «ПВС–ВТК–СМВ» рекомендуется использовать при оценке уровня ЭБ как отдельных конструктивных решений, так и комплекса сооружений и защитных устройств в целом. Использование МНК-В и МНК-Д на современном этапе является наиболее перспективным в сравнении с действующими рыбозащитными устройствами на водозаборных сооружениях ВТК СМВ.

Выводы. Многоцелевая функциональность ВТК в составе ПТС «ПВС–ВТК–СМВ» определяется семью критериальными показателями, по количественным значениям которых может устанавливаться и уровень ЭБ рассматриваемого ВТК.

На основе критериальных показателей сформировано базовое понятие ЭБ ВТК в составе специализированного типа ПТС «ПВС–ВТК–СМВ» – «Экологическая безопасность в пространстве и времени в зонах влияния ВТК определяется уровнем защищенности ПВС водного объекта по сохранению в нем естественного биоразнообразия ихтиофауны и флоры, а СМВ от токсичных микроорганизмов и процессов развития дрейссены в трубопроводах».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бондаренко В.Л., Семенова Е.А., Алиферов А.В., Клименко О.В. Природно-технические системы в использовании водных ресурсов: территории бассейнов геосистем: моногр. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2016. 204 с.
2. Хецуриани Е.Д., Костюков В.П., Угроватова Е.Г. Гидрологические исследования на реке Дон Александровский ОСВ // Procedia техники. Т. 150: 2-я Международная конференция по промышленному машиностроению, ICIE 2016; Челябинск; Российская Федерация; 19 мая 2016 – 20 мая 2016. С. 2358–2363.
3. Природообустройство: территории бассейновых геосистем: Учеб. пособие / под общ. ред. И.С. Румянцева. Ростов-н/Д: Изд. центр «МарТ», 2010. 528 с.
4. Бондаренко В.Л., Скибин Г.М., Азарова В.Н., Семенова Е.А., Приваленко В.В. Экологическая безопасность в прудообустройстве, водопользовании и строительстве: оценка экологического состояния бассейновых геосистем. Новочеркасск, 2016. 416 с.
5. Saling P., Hover R. (ed.); "Metrics for Sustainability" as part of RSC Green Chemistry No. 4; Sustainable Solutions for Modern Economies Edited by Rainer Hufer; The Royal Society of Chemistry; "Green Chemistry Series" edited by the Royal Society of Chemistry Series Editors: J. Clark, University of York, G. Kraus, Iowa State University, 2009. P. 25–37.

6. Ковальчук М.В. От синтеза к науке – конференции в образовании // Образовательная политика. 2010. № 11-12. С. 49–50.
7. Бондаренко В.Л., Семенова Е.А., Алиферов А.В., Клименко О.В. Методика формирования новых идей в технологических процессах использования водных ресурсов // Вестн. Волгогр. гос. архитектурно-строительного ун-та. Строительство и архитектура. 2018. Т. 50. С. 73–79.
8. Стефаненко И.В., Семенова Е.А., Клименко О.В., Бондаренко В.А. Основы методологии разработки технической теории природно-технических систем в использовании водных ресурсов // Прикладная механика и материалы. 2018. Вып. 875. С. 141–144.
9. Скрябин А.Ю., Поповьян Г.В., Тронь И.А. Изменение качества воды реки Дон. Изучение факторов, влияющих на интенсивное развитие микроводорослей // Технологии очистки воды «ТЕХНОВОД-2016»: Материалы IX Межд. науч.-практ. конф.; г. Ростов-на-Дону, 5–7 окт. 2016 г. / Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М.И. Платова. Новочеркасск: Лик, 2016. 300 с.
10. Скрябин А.Ю., Поповьян Г.В., Тронь И.А. Изучение факторов, влияющих на интенсивное развитие микроводорослей в реке Дон // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 4.
11. Дворецкий А.Т., Клевев К.Н. Оценка экологической безопасности устройств прямого солнечного нагрева // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2017. № 4.

Хецуриани Елгуджа Демурович, канд. техн. наук, доц.

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

Получено после доработки 04.05.18

Khetsuriani Elgudzha Demurovich, PhD, Ass. Professor

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

WATER TECHNOLOGICAL COMPLEXES COMPOSED OF NATURAL-TECHNICAL SYSTEMS MULTI-PURPOSE WATER

The purpose of the research is water intake technological complexes (WITC), which include a water intake bucket with a complex of different types of hydraulic structures and protective devices as part of a specialized type of natural and technical systems (NTS) “Natural water environment–water intake technological complex–a system of multi-purpose water supply” (NWE–WITC–SMWS), which are multi-purpose man-made companions providing the selection of the estimated water consumption from the water body, hereinafter referred to as NWE, with the provision of regulatory requirements of environmental safety (ES) in the areas of influence. The boundaries of the zone of influence of WITC within the water body and SMWS are determined on the basis of the results of complex natural and laboratory studies. Assessment of the impact of structural elements of WITC on the level of protection of NWE for the conservation of biodiversity of ichthyofauna and flora in the water body and the vital interests of the living

population of the urban economy SMWS has necessitated the justification of the dominant environmental factors that determine the basic criteria of ES in the areas of influence of WITC. On the basis of the results of monitoring studies of the ecological state in the areas of influence of WITC, placed on the Lower reaches, from the Tsimlyansk reservoir to the mouth of the river. Don, used constructive solutions on water intake devices, the level of protection of NWE for the conservation of biodiversity of ichthyofauna and flora in the water body and the energy of important interests of the living population in cities and settlements, for the quantitative assessment of ES required the development of safety criteria.

Key words: system, environmental safety, water technological complexes, the criterion of ecological security, water object, system of multi-purpose water supply of municipal economy.

REFERENCES

1. Bondarenko V.L., Semenova E.A., Aliferov A.V., Klimenko O.V. Prirodno-tekhnicheskie sistemy v ispol'zovanii vodnykh resursov: territorii basseynov geosistem [Natural-technical system in the use of water resources: basins of the geosystems: monograph]. Novocherkassk: URGU (NPI), 2016. 204 p. (in Russian)
2. Khetsuriani E.D., Kostyukov V.P., Ugrovatova E.G. Hidrologicheskie issledovaniya na reke Don Aleksandrovskiy OSV [Hydrological studies on the river don in Alexander salt Intake structures]. Procedia tekhniki [Procedia engineering]. 2016. Vol. 150. Pp. 2358–2363. (in Russian)
3. Prirodoobustroystvo: territorii basseynovykh geosistem [Environmental engineering: areas of basin geosystems: study guide]. Rostov-on-Don: publishing center “MarT”, 2010. 528 p. (in Russian)
4. Bondarenko V.L., Skibin G.M., Azarova V.N., Semenova E.A., Privalenko V.V. Ekologicheskaya bezopasnost' v prudoobustroystve, vodo-pol'zovanii i stroitel'stve: otsenka ekologicheskogo sostoyaniya basseynovykh geosistem [Environmental security in precooperative, water and development: assessment of ecological state of basin geosystems]. Novocherkassk, 2016. 416 p. (in Russian)
5. Saling P., Hover R. (ed.) “Metrics for Sustainability” as part of RSC Green Chemistry No. 4; Sustainable Solutions for Modern Economies Edited by Rainer Hufer; the Royal Society of Chemistry; “Green Chemistry Series” edited by the Royal Society of Chemistry Series: J. Clark, University of York, G. Kraus, Iowa state University, 2009. Pp. 25–37.
6. Koval'chuk M.V. Ot sinteza k nauke – konferentsii v obrazovanii [From synthesis to science-conference in education]. Obrazovatel'naya politika [Educational policy]. 2010. No. 11–12. Pp. 49–50. (in Russian)
7. Bondarenko V.L., Semenova E.A., Aliferov A.V., Klimenko O.V. Metodika formirovaniya novykh idey v tekhnologicheskikh protsessakh ispol'zovaniya vodnykh resursov [Methodology of formation of new ideas in the technological processes of water resources use]. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Science Journal of Volgograd state University of architecture and construction. Construction and architecture]. 2018. Vol. 50. Pp. 73–79. (in Russian)
8. Stefanenko I.V., Semenova E.A., Klimenko O.V., Bondarenko V.A. Osnovy metodologii razrabotki tekhnicheskoy teorii prirodno-tekhnicheskikh sistem v ispol'zovanii vodnykh resursov [Fundamentals of methodology of development of the technical theory of natural and technical systems in the use of water resources]. Prikladnaya mekhanika i materialy [Applied mechanics and materials]. 2018. Vol. 875. Pp. 141–144. (in Russian)

9. S c r y a b i n A.Yu., P o p o v ' y a n G.V., T r o n ' I.A. Izmenenie kachestva vody reki Don. Izuchenie faktorov, vliyayushchikh na intensivnoe razvitie mikrovodorosley [Change in the water quality of the river don. A study of factors influencing the intensive development of algae]. Tekhnologii ochistki vody "TEKHNOVOD-2016": Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Water purification Technology "TEKHNOVOD-2016": materials of the IX Intern. scientific.-prakt. Conf.; Rostov-on-Don, 5–7 October 2016]. Novocherkassk: Lik, 2016. 300 p. (in Russian)
 10. S c r y a b i n A.Yu., P o p o v ' y a n G.V., T r o n ' I.A. Izuchenie faktorov, vliyayushchikh na intensivnoe razvitie mikrovodorosley v reke Don [Study of factors influencing the intensive development of algae in the river Don]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary technique]. 2017. No. 4. (in Russian)
 11. D v o r e t s k i y A.T., K l e v e t s K.N. Otsenka ekologicheskoy bezopasnosti ustroystv pryamogo solnechnogo nagreva [Environmental safety assessment of direct solar heating devices]. Biosfernaya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii [Biosphere compatibility: human, region, technologies]. 2017. No. 4. (in Russian)
-

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ



УДК 627.82:528.48

В.С. ХОРОШИЛОВ, А.Г. БАРЛИАНИ, П.Н. ГУБЕНИН

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ВЫСОКОНАПОРНОЙ ПЛОТИНЫ САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС НА ЭТАПЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОСЛЕ АВАРИИ 2009 г.

Представлены результаты построения математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядка для описания деформационного процесса перемещений контролируемых точек тела плотины Саяно-Шушенской ГЭС. В силу того, что сезонные изменения температуры воздуха сильно зависимы от изменения основных воздействующих факторов (гидростатического давления и температуры бетона тела плотины), процесс конструирования математических моделей осуществлен путем декорреляции воздействующих факторов в результате их последовательного ввода в модель. Представлены этапы оценивания прогнозных значений при построении математических моделей и результаты прогнозирования по различным моделям на этапах эксплуатации плотины после аварии 2009 г.

К л ю ч е в ы е с л о в а: геодезические данные, динамическая модель, прогнозирование, перемещение контролируемых точек, деформации конструкции.

Введение. В соответствии с принятой «Методикой»¹ и положениями Федерального закона о безопасности гидротехнических сооружений² одним из обязательных условий диагностического контроля плотины Саяно-Шушенской ГЭС (СШГЭС) является разработка прогнозных математических моделей с целью исследования закономерностей процесса развития деформации сооружения. Прогнозирование в этом случае осуществляется по результатам геодезических наблюдений за изучаемыми деформациями методом прогнозной экстраполяции и может выполняться как с помощью прогнозных моделей кинематического вида (регрессионных), так и динамических моделей в зависимости от полноты и качества исходных данных [1–7]. При этом возможно смоделировать различные, в том числе и ведущие к необратимым изменениям составляющие, например, такие как пластичность, возникновение

¹ Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений. РД 153-34.2-21.342-00. М.: РАО «ЕЭС России», 2001. 22 с.

² Федеральный закон № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» // СЗ РФ. 1997. № 30. Ст. 3589.

© Хорошилов В.С., Барлиани А.Г., Губенин П.Н., 2018

и продвижение трещин, необратимые перемещения тела плотины, реологические свойства основания сооружения [1, 7–10] и др.

Модели для оценки и прогнозирования прочности и устойчивости гидротехнических сооружений и их оснований представлены в ряде работ на основе: искусственных нейронных сетей в сочетании с гибридным методом конечных элементов [11]; динамического анализа состояния бетонных плотин в частотной области за счет изменения формы колебаний [12]; решения дифференциальных уравнений для моделирования деформаций по данным единой системы объединенных датчиков [13]; теории нестационарных временных рядов для анализа структурных данных с использованием алгоритма максимизации ожидания для нахождения оценок максимального правдоподобия параметров вероятностных моделей [14]; совместного подхода технологии вейвлет-анализа для создания исходной модели данных о поведении плотины с последующим построением идентификационной модели, способной осуществлять связь между нагрузками и поведением плотины [15]; разработки алгоритма прогнозирования УВБ с целью установления оптимального режима «наполнения-сработки» водохранилища [16] и др.

Отметим, что модели кинематического типа отражают зависимость величин деформаций от фактора времени, в то время как модели динамического типа представляют процесс исследования деформаций с учетом совместного влияния времени и основных воздействующих факторов. С данной точки зрения динамические модели более совершенны, имеют подвижную структуру с возможностью ее корректирования, соответствующую в большей степени самой физической сущности развития деформационного процесса, а также реализуют влияние инерционного характера взаимодействия сооружения с окружающей средой путем реакции на изменения во времени основных воздействующих факторов [1].

Дискретность модели, т.е. цикличность натуральных наблюдений, может быть выбрана при обязательном условии, что геодезические наблюдения должны охватывать основные закономерности развития исследуемого процесса деформации и изменений основных воздействующих факторов. Так, в результате исследований выяснилось, что для более корректного построения прогнозных моделей наиболее предпочтительна дискретность натуральных наблюдений в 15 дней [17].

Корреляционная зависимость воздействующих факторов является следствием того, что на большинстве эксплуатируемых ГЭС сезонные колебания температуры воздуха практически функционально связаны с изменениями гидростатического давления (УВБ) и температурой бетона тела плотины как в период наполнения водохранилища, так и в период его «разгрузки» [8, 14, 18, 19]. Имеются и другие подобные связи между основными воздействующими факторами [20–23], поэтому одновременный ввод этих факторов в строящуюся прогнозную модель приводит, как правило, к ее неустойчивости. Вследствие данного обстоятельства декорреляция основных входных воздействий может быть осуществлена путем их последовательного ввода в модель, например, как это показано в работе авторов для декоррелирующей модели 1-го порядка [24]. Такой прием дает возможность корректно учитывать остаточную часть инерционного запаздывания и выполнять про-

гнозирование по фактическим значениям входных воздействующих факторов, наблюдавшимся ранее на интервале транспортного запаздывания.

Методы решения. В соответствии с рекомендациями^{1,2} в качестве одного из диагностических показателей контроля СШГЭС выбраны радиальные перемещения гребней плотины: левобережной секции 18, ключевой секции 33 и правобережной секции 45 (рис. 1) и соответствующие им значения параметров УВБ, и температура бетона $T_{\text{низ}}$, $T_{\text{верх}}$ в базовых точках [1].

В качестве исходных данных и инверсной верификации строящихся математических моделей были использованы данные измерений, полученные из работ [1, 4, 8, 10, 20]. Период основания прогноза для всех строящихся моделей составил: 30 апреля 2007 г. – 15 мая 2008 г. Этот выбор был обоснован тем, что данный временной интервал входит в период, когда плотина сохраняла монолитность после ремонта (1995–2003 гг.), воспринимая при этом расчетный напор [4], а также тем, что данный временной период является предшествующим аварии 19 сентября 2009 г.

Были построены несколько вариантов прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядка для изучения перемещений контролируемых точек плотины СШГЭС.

Выбор рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядка для прогнозирования был обусловлен тем, что они позволяют последовательно и наглядно, шаг за шагом, начиная с последних значений перемещений и остаточных ошибок на периоде основания прогноза, вычислять прогнозные значения контролируемых точек. В то же время данный тип уравнений корректно учитывает инерционный характер взаимодействия сооружения с окружающей средой, реагируя на основные воздействующие факторы.

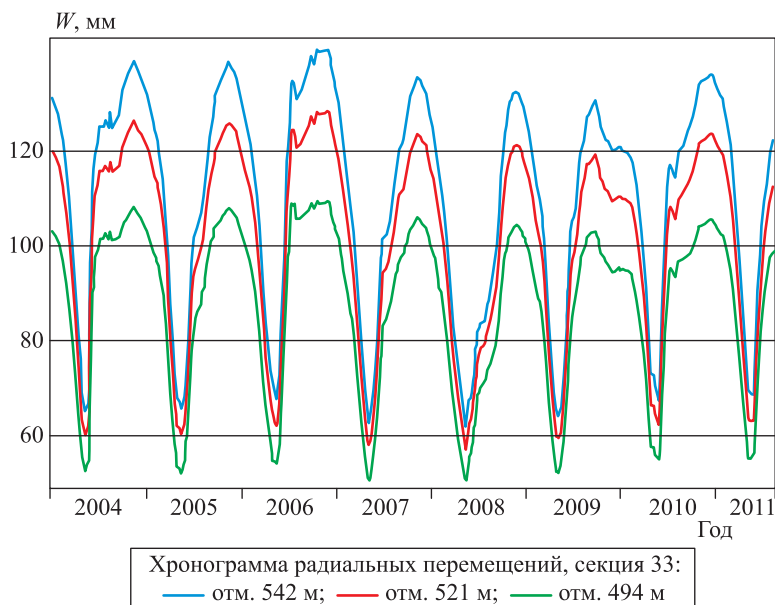


Рис. 1. Графики перемещений гребня плотины, изменения УВБ и температура бетона тела плотины в базовой точке $T_{\text{низ}}$, $T_{\text{верх}}$ во времени по секции 33

За основные входные воздействия были приняты: U_k – гидростатическое давление (УВБ) и $T_{\text{книз}}$, $T_{\text{кверх}}$ – температура бетона тела плотины в нижней и верхней базовых точках. Последовательность ввода определялась первичностью и вторичностью действия факторов, т.е. вначале вводилось влияние температуры $T_{\text{книз}}$ или $T_{\text{кверх}}$ в базовых точках, а затем – гидростатическое давление либо их сочетания. В качестве исходных рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядка были использованы модели вида [3, 24]:

$$\begin{aligned} U_k &= \varphi_1 U_{k-1} + \beta_1 T_{\text{книз}} + U_0, \\ x_k &= \varphi_2 x_{k-1} + \beta_2 T_{\text{книз}} + x_0, \\ \Delta x_k &= \varphi_3 \Delta x_{k-1} + \beta_3 \Delta U_k, \\ \omega_k &= AP2 \end{aligned} \quad (1)$$

и

$$\begin{aligned} U_k &= \varphi_1 U_{k-1} + \beta_1 T_{\text{книз}} + \beta_2 T_{\text{кверх}} + U_0, \\ x_k &= \varphi_2 x_{k-1} + \varphi_3 x_{k-2} + \beta_3 T_{\text{книз}} + x_0, \\ \Delta x_k &= \varphi_4 \Delta x_{k-1} + \beta_4 \Delta U_k + \Delta x_0, \\ \omega_k &= AP2. \end{aligned} \quad (2)$$

В моделях (1) и (2) первые два уравнения представляют основные входные воздействия U_k , $T_{\text{книз}}$ и $T_{\text{кверх}}$, вызывающие перемещение x_k , и выражают зависимость гидростатического давления и перемещения от температуры бетона тела плотины. Третье уравнение описывает зависимость Δx_k от ΔU_k , где Δx_k – найденные по второму уравнению разности между фактическими значениями перемещений x_k и вычисленными на периоде основания прогноза, а ΔU_k – аналогичные соответствующие разности между фактическими и вычисленными по первому уравнению значениями U_k ; четвертое уравнение – одна из разновидностей шумовой компоненты, например, $AP2$, решение которого будет показано ниже.

Замена в выражениях (1) и (2) значений x_k , U_k , $T_{\text{книз}}$ и $T_{\text{кверх}}$ их центрированными по времени значениями: $\dot{x} = x_k - \bar{x}$, $\dot{U} = U_k - \bar{U}$, $\dot{T} = T_{\text{книз}} - \bar{T}$, $\dot{T} = T_{\text{кверх}} - \bar{T}$ ($\bar{x}$, $\bar{U}$, $\bar{T}_{\text{книз}}$ – средние величины перемещения и входных параметров: уровень верхнего бьефа и температуры, взятых на периоде основания прогноза), как было показано в работе [25], позволяет существенно упростить процесс вычислений и повышает обусловленность систем нормальных уравнений.

Решение систем уравнений (1) и (2) осуществлялось поэтапно. На первом этапе определялась зависимость изменения гидростатического давления от температуры воздуха (отметим, что для построения прогнозных моделей нами использовалась температура как в нижней $T_{\text{книз}}$, так впоследствии и в верхней базовой точке $T_{\text{кверх}}$). С использованием метода наименьших квадратов по результатам наблюдений за входом $\{T_{\text{книз}}\}$ и выходом $\{U_k\}$ вначале оценивались параметры модели на периоде основания прогноза $k = 1, 2, \dots, N$. С этой целью минимизировался функционал вида

$$F_1(\varphi_1, \beta_1) = \sum_{k=2}^N (U_k - \hat{U}_{k/k-1})^2,$$

через $\hat{U}_{k/k-1}$ обозначено условное математическое ожидание первого уравнения из выражений (1) и (2), которое, например, для модели (1) имеет вид

$$M\{U_k / U_{k-1}, T_{\text{книз}}\} = \hat{U}_{k/k-1} = \hat{\phi}_1 U_{k-1} + \hat{\beta}_1 T_{\text{книз}}. \quad (3)$$

Оценки параметров $\hat{\phi}_1, \hat{\beta}_1$ получали в процессе решения соответствующих систем нормальных уравнений. Для строящихся моделей 1-го и 2-го порядка были получены все возможные первые уравнения (4), выражающие зависимость гидростатического давления от температуры бетона тела плотины:

$$\begin{aligned} U_k &= 0,7180U_{k-1} + 0,7754T_{\text{книз}} + 142,243, \\ \hat{U}_{k/k-1} &= 0,8612U_{k-1} + 0,6062T_{\text{книз}} - 0,0748T_{\text{кверх}} + 68,848, \\ U_k &= 0,7764U_{k-1} + 3,0060T_{\text{кверх}} + 100,260. \end{aligned} \quad (4)$$

На втором этапе определялась зависимость перемещения от влияния температуры, т.е. оценивались параметры по результатам наблюдений за входом $\{T_{\text{книз}}\}$ или $\{T_{\text{кверх}}\}$ и выходом $\{x_k\}$ подобно оцениванию на первом этапе. С этой целью выполнялась минимизация функционала

$$F_2(\phi_2, \beta_2) = \sum_{k=2}^N (x_k - \hat{x}_{k/k-1})^2; \hat{x}_{k/k-1}, \text{ представляющего собой условное ма-}$$

тематическое ожидание второго уравнения из выражений (1) и (2), которое, например, для модели (1) имеет вид

$$M\{x_k / x_{k-1}, T_{\text{книз}}\} = \hat{x}_{k/k-1} = \hat{\phi}_2 x_{k-1} + \hat{\beta}_2 T_{\text{книз}}. \quad (5)$$

Оценки параметров $\hat{\phi}_2, \hat{\beta}_2$ получали в процессе решения систем нормальных уравнений соответствующих моделей. Для всех строящихся моделей были получены все возможные вторые уравнения (6) для моделей (1) и (2), выражающие зависимость перемещения от температуры бетона тела плотины:

$$\begin{aligned} x_k &= 0,8174x_{k-1} + 1,1214T_{\text{книз}} + 11,523, \\ \hat{x}_{k/k-1} &= 0,6555x_{k-1} + 1,0275T_{\text{книз}} + 13,2756T_{\text{кверх}} - 31,219, \\ \hat{x}_{k/k-1} &= 0,2950x_{k-1} + 0,4362x_{k-2} + 1,6151T_{\text{книз}} + 13,027, \\ x_k &= 0,5322x_{k-1} + 20,7204T_{\text{кверх}} - 45,273. \end{aligned} \quad (6)$$

На третьем этапе определялись соответствующие разности Δx_k между фактическими и вычисленными с помощью второго уравнения значениями перемещений x_k и разности ΔU_k между фактическими и вычисленными по первому уравнению значениями гидростатического давления U_k . Далее оценивались параметры по результатам наблюдений за входом $\{\Delta U_k\}$ и выходом $\{\Delta x_k\}$ в результате минимизации функционала вида

$$F_3(\phi_3, \beta_3) = \sum_{k=2}^N (\Delta x_k - \Delta \hat{x}_{k/k-1})^2,$$

где через $\hat{x}_{k/k-1}$ обозначено условное математическое ожидание третьего уравнения из выражений (1) и (2), которое, например, для модели (1) имеет вид

$$M\{\Delta x_k / \Delta x_{k-1}, \Delta U_k\} = \Delta \hat{x}_{k/k-1} = \hat{\phi}_3 \Delta x_{k-1} + \hat{\beta}_3 \Delta U_k. \quad (7)$$

Оценки параметров $\hat{\phi}_3, \hat{\beta}_3$ находили из решения полученных систем нормальных уравнений для соответствующих моделей. Для всех строящихся моделей были получены все возможные третьи уравнения (8), выражающие разности фактических и вычисленных по второму уравнению значений x_k и ΔU_k – соответствующие разности между фактическими и вычисленными по первому уравнению значениями U_k :

$$\begin{aligned} \Delta x_k &= 0,0062 \Delta x_{k-1} + 1,6224 \Delta U_k + 0,1338 + 1,2290 \omega_k, \\ \Delta x_k &= 0,3803 \Delta x_{k-1} + 1,0213 \Delta U_k + 4,205 + 1,8630 \omega_k, \\ \Delta x_k &= 0,0355 \Delta x_{k-1} + 1,5566 \Delta U_k - 0,128 + 1,2592 \omega_k, \\ \Delta x_k &= 0,3808 \Delta x_{k-1} + 1,0372 \Delta U_k - 2,957 + 1,9418 \omega_k. \end{aligned} \quad (8)$$

На последнем этапе определялись порядок модели авторегрессии и оценивание параметров корреляционной функции [26] с использованием формулы для оценивания временных рядов

$$\hat{K}_\varepsilon[m] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-m} \varepsilon_k \varepsilon_{k+m}, \quad (9)$$

где временной сдвиг $m = 0, 1, 2, \dots, M \ll N$.

Остаточные ошибки, как результат действия всех оставшихся неучтенных и случайных факторов $\varepsilon_k = x_k - \hat{x}_{k/k-1} = \gamma \omega_{k-1}$, позволяют характеризовать строящуюся прогнозную модель с точки зрения ее структурной идентификации; в то же время – это характеристика свойств шумовой компоненты ω_k . В результате, исследуя аналитически влияние остаточных ошибок, имеется возможность математического описания процесса шума ω_k известными моделями авторегрессии 1-го или 2-го порядка [3].

Порядок модели авторегрессии выбирался в процессе анализа построенных графиков корреляционной функции по остаточным ошибкам. Для всех строящихся моделей графики (рис. 2) свидетельствуют о том, что

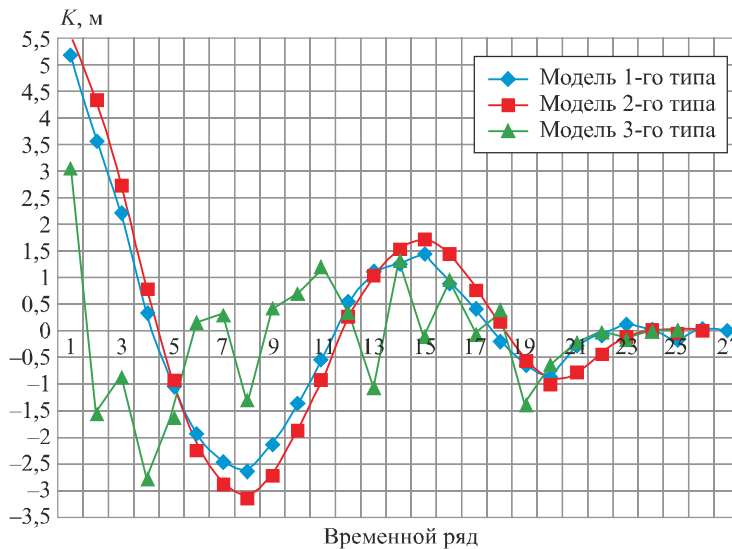


Рис. 2. График корреляционной функции

описание процесса шума следует производить моделью авторегрессии 2-го порядка вида

$$\omega_k = \mu\omega_{k-1} + \eta\omega_{k-2} + \xi_k, \quad (10)$$

где μ, η – оцениваемые параметры.

Оценка параметров μ, η осуществлялась в результате минимизации функционала следующего вида

$$F_4(\mu, \eta) = \sum_{m=1}^M (\hat{K}_\varepsilon[m] - \mu\hat{K}_\varepsilon[m-1] - \eta\hat{K}_\varepsilon[m-2])^2,$$

т.е. оценки μ, η находились в процессе решения соответствующей системы нормальных уравнений, а оценка коэффициента γ производилась с использованием формулы

$$\hat{\gamma} = \sqrt{\frac{\hat{K}_\varepsilon[0]}{\hat{K}_\omega[0]}}. \quad (11)$$

Для оценивания параметров $AP2$ были получены системы нормальных уравнений для всех соответствующих моделей, по которым далее были вычислены все оценки: $\hat{\mu}, \hat{\eta}, \hat{\gamma}$. Построенные модели шумовой компоненты ω_k имеют вид:

$$\begin{aligned} \omega_k &= 0,3790\omega_{k-1} + 0,1530\omega_{k-2} + \xi_k, \\ \omega_k &= 0,4404\omega_{k-1} - 0,1255\omega_{k-2} + \xi_k, \\ \omega_k &= 0,4418\omega_{k-1} + 0,1490\omega_{k-2} + \xi_k, \\ \omega_k &= 0,5736\omega_{k-1} - 0,2255\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (12)$$

Результаты исследований. Построенные окончательно прогнозные модели соответственно имеют вид:

Модель $\Delta x(\Delta U_k; T_{\text{книз}}; x_0; U_0)$

$$\begin{aligned} U_k &= 0,7180U_{k-1} + 0,7754T_{\text{книз}} + 142,243, \\ x_k &= 0,8174x_{k-1} + 1,1214T_{\text{книз}} + 11,523, \\ \Delta x_k &= 0,0062\Delta x_{k-1} + 1,6224\Delta U_k + 0,1338 + 1,2290\omega_k, \\ \omega_k &= 0,3790\omega_{k-1} + 0,1530\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (13)$$

Модель $\Delta x(\Delta U_k; T_{\text{книз}}; T_{\text{кверх}}; x_0; U_0)$

$$\begin{aligned} \hat{U}_{k/k-1} &= 0,8612U_{k-1} + 0,6062T_{\text{книз}} - 0,0748T_{\text{кверх}} + 68,848, \\ \hat{x}_{k/k-1} &= 0,6555x_{k-1} + 1,0275T_{\text{книз}} + 13,2756T_{\text{кверх}} - 31,219, \\ \Delta x_k &= 0,3803\Delta x_{k-1} + 1,0213\Delta U_k + 4,205 + 1,8630\omega_k, \\ \omega_k &= 0,4404\omega_{k-1} - 0,1255\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (14)$$

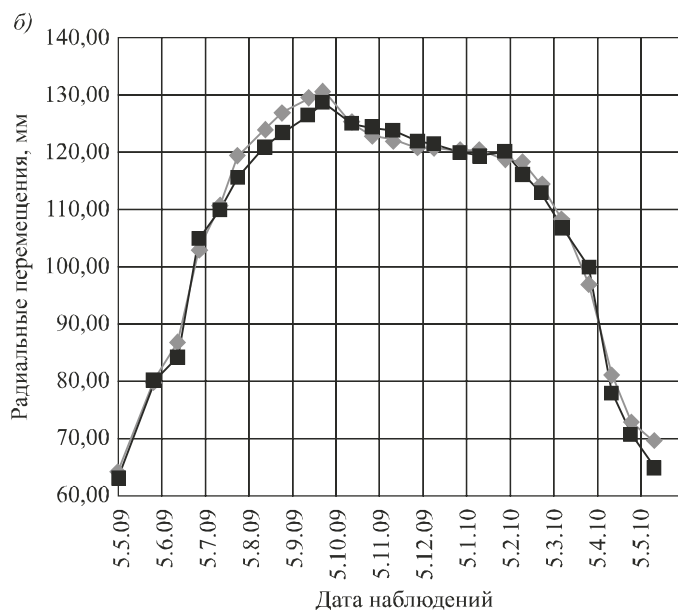
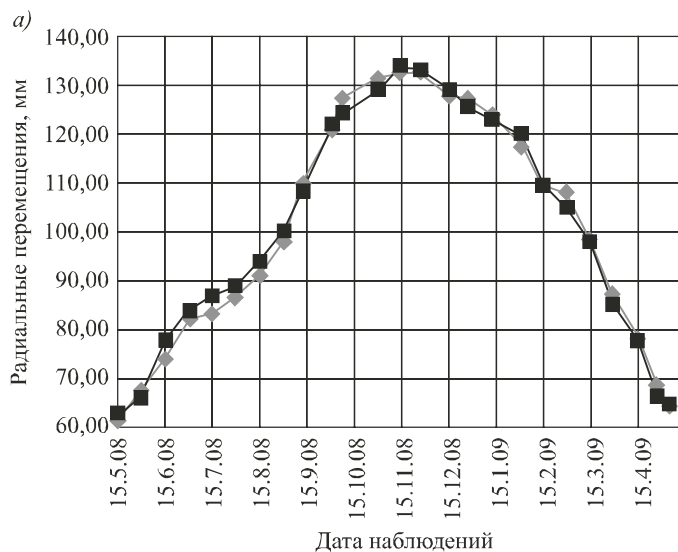
Модель $\Delta x(\Delta U_k; T_{\text{книз}}; x_0; U_0)$

$$\begin{aligned} U_k &= 0,7180U_{k-1} + 0,7754T_{\text{книз}} + 142,243, \\ \hat{x}_{k/k-1} &= 0,2950x_{k-1} + 0,4362x_{k-2} + 1,6151T_{\text{книз}} + 13,027, \\ \Delta x_k &= 0,0355\Delta x_{k-1} + 1,5566\Delta U_k - 0,128 + 1,2592\omega_k, \\ \omega_k &= 0,4418\omega_{k-1} + 0,1490\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (15)$$

Модель $\Delta x(\Delta U_k; T_{\text{кверх}}; x_0; U_0)$

$$\begin{aligned} U_k &= 0,7764U_{k-1} + 3,0060T_{\text{кверх}} + 100,260, \\ x_k &= 0,5322x_{k-1} + 20,7204T_{\text{кверх}} - 45,273, \\ \Delta x_k &= 0,3808\Delta x_{k-1} + 1,0372\Delta U_k - 2,957 + 1,9418\omega_k, \\ \omega_k &= 0,5736\omega_{k-1} - 0,2255\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (16)$$

Окончательный этап разработки прогнозной модели заключался в анализе полученных результатов с контрольным прогнозированием на основе принципа инверсной верификации. В случаях неудовлетворительного качества построенной прогнозной модели заново повторялись все предыдущие этапы ее разработки с целью найти другой вид или структуру модели, либо более тщательно отнестись к выбору основных воздействующих факторов



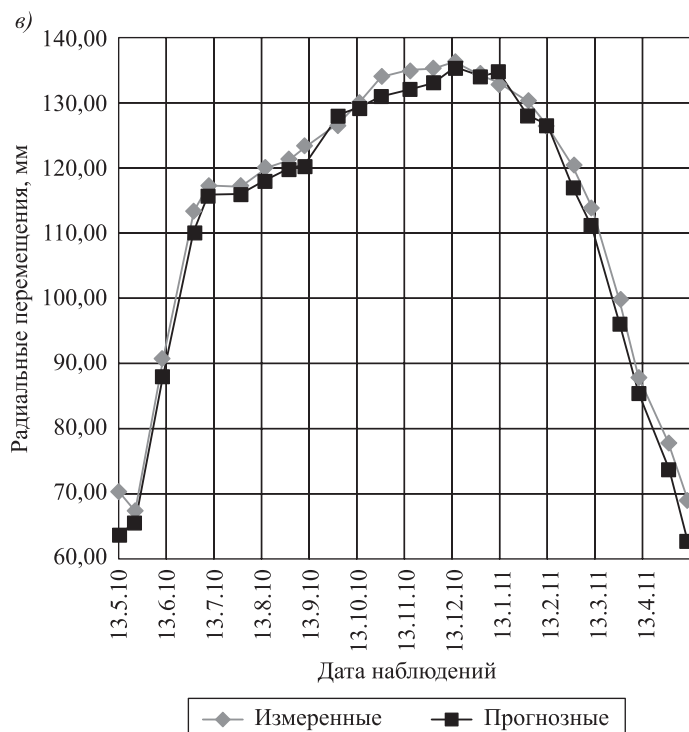


Рис. 3. График поведения измеренных и прогнозных перемещений точек тела плотины для этапов эксплуатации плотины 2008–2009 гг. (а), 2009–2010 (б) и 2010–2011 гг. (в)

и возможному транспортному запаздыванию, а также выбору периода основания прогноза, которые наиболее адекватно описывают исследуемый деформационный процесс.

На рис. 3 представлены графики измеренных и прогнозных перемещений точек тела плотины для различных временных этапов эксплуатации плотины с использованием моделей (14) и (15). Расхождения между прогнозными и реальными перемещениями не превысили утроенной величины стандарта 3σ погрешности натурных измерений контролируемых точек тела плотины.

Анализ графиков изменения температуры $T_{\text{книз}}$ и УВБ показали их различие по запаздыванию от величины перемещения в 2009–2010 гг. в сравнении с близкими между собой графиками запаздывания в периоды эксплуатации 2007–2008 (период основания прогноза, на котором строилась модель) и 2008–2009 гг., причем это отличие проявляется примерно к концу января и продолжается до конца сработки водохранилища. В эти месяцы наблюдаются большие расхождения в прогнозных значениях в ветви сработки 2009–2010 гг. Подобное запаздывание видно и по ветви нагружения 2008–2009 гг. в сравнении с ветвью нагружения 2007–2008 гг. с конца июня и продолжается до конца октября. Поэтому использование такого методического приема, как введение транспортного запаздывания при прогнозировании, оказало положительный эффект для корректировки прогнозных значений.

Кроме того, нужно отметить еще одно обстоятельство, а именно, что возврат плотины в исходное состояние (на момент сработки водохранилища) отличается от прогнозных значений на величину порядка 7–8 мм. На этот счет пока нет единого мнения в технической литературе, является ли это необратимыми перемещениями плотины или это результат изменения воздействующих факторов [4, 21]. Данное отклонение нам также пока необъяснимо, но так как за прошедшие три года эксплуатации плотины 2009–2010, 2010–2011 и 2011–2012 гг. эта величина изменилась и составила величины соответственно 69,13; 70,36 и 72 мм, что требует дополнительных исследований.

Закключение. 1. Можно считать, что прогнозирование объединяет в особой форме различные стороны геодезических исследований, выполненных с определенной точностью, и которые допустимо рассматривать как опережающие время результаты наблюдений, а математические модели, построенные для прогнозирования, можно использовать для анализа механизма протекающих в сооружениях процессов на основе обобщенных закономерностей развития перемещений наблюдаемых точек.

2. Возможности для прогнозирования по моделям 1-го и 2-го порядка практически равновозможны, однако, модели 2-го порядка дают несколько улучшенные прогнозные результаты.

3. Введение транспортного запаздывания однозначно показало улучшение прогнозных значений для всех типов моделей. При этом корректировка прогнозных значений контролируемых точек должна осуществляться путем введения транспортного запаздывания на этапе окончательного прогнозирования по моделям, которые были построены без его введения на начальном этапе их конструирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В у л ь ф о в и ч Н.А., Г о р д о н Л.А., С т е ф а н е н к о Н.И. Арочно-гравитационная плотина Саяно-Шушенской ГЭС (Оценка технического состояния по данным натурных наблюдений) // Изв. Всерос. науч.-исслед. ин-та гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2012. 204 с.
2. А л е к с а н д р о в Ю.Н. Использование расчетной модели плотины Саяно-Шушенской ГЭС для оценки и прогнозирования ее состояния // Гидротехн. стр-во. 2008. № 11. С. 64–69.
3. Г у л я е в Ю.П., Х о р о ш и л о в В.С. Математическое моделирование. Прогнозирование деформаций сооружений гидроузлов по геодезическим данным (динамическая модель). Новосибирск: СГГА, 2012. 81 с.
4. В у л ь ф о в и ч Н.А. Оценка несущей способности плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным натурных перемещений в послеаварийный период эксплуатации (2009–2012 гг.) // Гидротехн. стр-во. 2013. № 4. С. 10–18.
5. O r e k h o v V.V. Mathematical model of the behavior of the rock mass enclosing chamber workings at the Rogunskaya HPP // Power Technology and Engineering. 2011. T. 44, No. 5. P. 369–373.
6. S a l a z a r F., M o r a n R., T o l e d o M.A. Data-based models for prediction of dam behavior: A review and some methodological considerations // Archives of Computational Methods in Engineering. 2015. P. 1–21.

7. Речицкий В.И., Пудов К.О. Уточнение деформационной модели основания бетонной плотины Богучанской ГЭС по данным натурных наблюдений // Гидротехн. стр-во. 2013. № 9. С. 3–9.
8. Юсупов Т.М., Решетникова Е.Н., Александров Ю.Н. Оценка состояния системы «плотина-основание» Саяно-Шушенской ГЭС по завершении этапа наполнения водохранилища в 2012 г. // Гидротехн. стр-во. 2013. № 4. С. 3–9.
9. Savich A.I., Il'in M.M., Elkin V.P., Rechiyskii V.I., Basova A.B. Geologic-engineering and geomechanical models of rock mass in the bed of the dam Sayano-Shushenskaya HPP // Power Technology and Engineering. 2013. T. 47, No. 3. P. 89–101.
10. Евстифеев А.Д., Костылев В.С., Храпков А.А. Определение прогнозных значений температур для точек наблюдения, расположенных в теле бетонной арочно-гравитационной плотины // Изв. Всерос. науч.-исслед. ин-та гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2012. Т. 267. С. 54–62.
11. Karimi I., Khaji N., Ahmadi M.T., Mirzayee M. System identification of concrete gravity dams using artificial neural networks based on a hybrid finite element-boundary element approach // Engineering Structures. 2010. Vol. 32, Iss. 11. P. 3583–3591.
12. Sani A.A., Lofti V. Dynamic analysis of concrete arch dams by ideal-coupled modal approach // Engineering Structures. 2010. Vol. 32, Iss. 5. P. 1377–1383.
13. Jafari M. Deformation modelling of structures enriched by inter-element continuity condition based on multi-sensor data fusion // Applied Mathematical Modelling. 2016. Vol. 40. P. 9316–9326.
14. Li F., Wang Zh., Liu G., Fu C., Wang J. Hydrostatic seasonal state model for monitoring data analysis of concrete dams // Structure and Infrastructure Engineering. 2015. Vol. 11, Iss. 12. P. 1616–1631.
15. Su H., Wu Zh., Wen Zh. Identification model for dam behavior based on wavelet network // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2007. Vol. 22, Iss. 6. P. 438–448.
16. Беллендир Е.Н., Гордон Л.А., Храпков А.А., Скворцова А.Е. Применение математического моделирования в системах оперативной оценки напряженно-деформированного состояния арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехн. стр-во. 2016. № 8. С. 51–55.
17. Кобелева Н.Н. Методические особенности построения прогнозных математических моделей для изучения деформаций высоких плотин // Вестн. СГУГиГ. 2017. Т. 22, № 2. С. 55–63.
18. Aleksandrov Y.N. Temperature conditions in the first column of the Sayano-Shushenskaya HPP dam from field observation data // Power Technology and Engineering. 2016. T. 50, No. 2. P. 130–141.
19. Ardito R., Maier G., Massalongo G. Diagnostic analysis of concrete dams based on seasonal hydrostatic loading // Engineering Structures. 2008. No. 30. P. 3176–3185.
20. Храпков А.А., Скворцова А.Е., Костылев В.С., Щерба Д.В. О построении математической модели арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Изв. Всерос. науч.-исслед. ин-та гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2011. Т. 264. С. 56–69.
21. Kostylev V.S. Use of mathematical «structure-bed» model to analyze changes in kinematic indicators of the concrete arch-gravity dam at the Sayano-Shushenskaya HPP from 2004 through 2012 // Power Technology and Engineering. 2013. Vol. 47, No. 3. P. 191–199.
22. Perner F., Obernhuber P. Analysis of arch dam deformations // Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China. 2010. Vol. 4, Iss. 1. P. 102–108.

23. Mata J., Castro A.T., Costa J. Constructing statistical models for arch dam deformation // Structural Control and Health Monitoring. 2014. Vol. 21, Iss. 35. P. 423–437.
24. Гуляев Ю.П., Хорошилов В.С., Лисицкий Д.В., Кобелева Н.Н. Прогнозирование процесса перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС на этапе эксплуатации 2007–2009 годов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2015. № 5. С. 23–28.
25. Хорошилов В.С., Кобелева Н.Н., Губонин П.Н. Математическое моделирование деформационного процесса для изучения перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС на основе динамической модели (2004–2007 гг.) // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 2. С. 49–58.
26. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. М.: Мир, 1974. Вып. 1. 405 с. Вып. 2. 197 с.

Хорошилов Валерий Степанович, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: Khoroshilovvs@mail.ru

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск

Барлиани Амридон Гемзаевич, канд. техн. наук, доц.

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск

Губонин Петр Николаевич, доц.; E-mail: gubonin-sib@list.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 25.05.18

Khoroshilov Valeriy Stepanovich, DSc, Professor; E-mail: Khoroshilovvs@mail.ru

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

Barliani Amridon Gemzaevich, PhD, Ass. Professor

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

Gubonin Petr Nikolaevich, Ass. Professor; E-mail: gubonin-sib@list.ru

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

THE FORECASTING PROCESS OF MOVEMENT PRESSURE OF THE SAYANO-SHUSHENSKAYA HYDROELECTRIC POWER PLANT DURING THE OPERATIONAL PHASE ALTER THE 2009 ACCIDENT

Results of construction of mathematical models of dynamic type on the basis of the recurrent equations of the 1st and 2nd orders for the description of deformation process of movements of controlled points of a body of a dam of Sayano-Shushenskaya HPP are presented. Due to the fact that seasonal changes in air temperature are strongly dependent on changes in the main influencing factors (hydrostatic pressure and temperature of the concrete dam body), the process of designing mathematical models is carried out by decorrelating the influencing factors as a result of their successive input into the model. The stages of evaluation of the predictive values in the construction of mathematical models and forecasting results of different models during operation of the dam after the accident in 2009.

Key words: geodetic data, dynamic model, forecasting, movements of controlled points, deformations of a construction.

REFERENCES

1. Vulfovich N.A., Gordon L.A., Stefanenko N.I. Arochno-gravitatsionnaya plotina Sayano-Shushenskoy GES [Arch-gravity dam of the Sayano-Shushenskaya HPP (Estimation of the technical condition based on the field studies)]. Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B.E. Vedeneeva [News of the All-Russian Vedeneev Hydraulic Engineering Research Institute]. 2012. 204 p. (in Russian)
2. Alexandrov Yu.N. Ispol'zovanie raschetnoy modeli plotiny Sayano-Shushenskoy GES dlya otsenki i prognozirovaniya ee sostoyaniya [Use of the design model of the Sayano-Shushenskaya HPP dam for estimation and prediction of its condition]. Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical construction]. 2008. No.11. Pp. 64–69. (in Russian)
3. Gulyaev Yu.P., Khoroshilov V.S. Matematicheskoe modelirovanie. Prognozirovaniye deformatsiy sooruzheniy gidrouzlov po geodezicheskim dannym (dinamicheskaya model') [Mathematical modeling. Prediction of deformations of hydrosystems according to geodetic data (dynamic model)]. Novosibirsk: SSUGT, 2012. 81 p. (in Russian)
4. Vulfovich N.A. Otsenka nesushchey sposobnosti plotiny Sayano-Shushenskoy GES po dannym naturnykh peremeshcheniy v posleavariynyy period ekspluatatsii (2009–2012 gg.) [Estimation of the bearing capacity of the Sayano-Shushenskaya HPP dam according to the data of field movements during the post-accident operation period (2009-2012)]. Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical construction]. 2013. No. 4. Pp. 10–18. (in Russian)
5. Orekhov V.V. Mathematical model of the behavior of the rock mass enclosing chamber workings at the Rogunskaya HPP. Power Technology and Engineering. 2011. T. 44, No. 5. Pp. 369–373.
6. Salazar F., Moran R., Toledo M.A. Databased models for prediction of dam behavior: A review and some methodological considerations. Archives of Computational Methods in Engineering. 2015. Pp. 1–21.
7. Rechitskiy V.I., Pudov K.O. Utochnenie deformatsionnoy modeli osnovaniya betonnoy plotiny Boguchanskoy GES po dannym naturnykh nablyudeniy [Refinement of the deformation model of the concrete dam foundation of the Boguchanskaya HPP according to field studies]. Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical construction]. 2013. No. 9. Pp. 3–9. (in Russian)
8. Yusupov T.M., Reshetnikova E.N., Alexandrov Yu.N. Otsenka sostoyaniya sistemy «plotina-osnovaniye» Sayano-Shushenskoy GES po zavershenii etapa napolneniya vodokhranilishcha v 2012 g. [Estimation of the “dam-base” system condition at the Sayano-Shushenskaya HPP after the completion of the reservoir filling in 2012]. Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical construction]. 2013. No. 4. Pp. 3–9. (in Russian)
9. Savich A.I., Il'in M.M., Elkin V.P., Rechitskii V.I., Basova A.B. Geologic engineering and geomechanical models of rock mass in the bed of the dam Sayano-Shushenskaya HPP. Power Technology and Engineering. 2013. T. 47, No. 3. Pp. 89–101.
10. Evstifeev A.D., Kostylev V.S., Khrapkov A.A. Opredelenie prognoznykh znacheniy temperatur dlya toчек nablyudeniya, raspolozhennykh v tele betonnoy arochno-gravitatsionnoy plotiny [Determination of predictive temperature values for observation points located in the body of a concrete arch-gravity dam]. Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im.

- B.E. Vedeneeva [News of the All-Russian Vedeneev Hydraulic Engineering Research Institute]. 2012. Vol. 267. Pp. 54–62. (in Russian)
11. Karimi I., Khaji N., Ahmadi M.T., Mirzayee M. System identification of concrete gravity dams using artificial neural networks based on a hybrid finite element-boundary element approach. *Engineering Structures*. 2010. Vol. 32, Iss. 11. Pp. 3583–3591.
 12. Sani A.A., Lofti V. Dynamic analysis of concrete arch dams by ideal-coupled modal approach. *Engineering Structures*. 2010. Vol. 32, Iss. 5. Pp. 1377–1383.
 13. Jafari M. Deformation modelling of structures enriched by inter-element continuity condition based on multi-sensor data fusion. *Applied Mathematical Modelling*. 2016. Vol. 40. Pp. 9316–9326.
 14. Li F., Wang Zh., Liu G., Fu C., Wang J. Hydrostatic seasonal state model for monitoring data analysis of concrete dams. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2015. Vol. 11, Iss. 12. Pp. 1616–1631.
 15. Su H., Wu Zh., Wen Zh. Identification model for dam behavior based on wavelet network. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2007. Vol. 22, Iss. 6. Pp. 438–448.
 16. Bellendir E.N., Gordon L.A., Khrapkov A.A., Skvortsova A.E. *Primenenie matematicheskogo modelirovaniya v sistemakh operativnoy otsenki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya arochno-gravitatsionnoy plotiny Sayano-Shushenskoy GES* [Application of mathematical modeling in the systems of operative evaluation of the stress-strain state of the arch-gravity dam of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical construction]. 2016. No. 8. Pp. 51–55. (in Russian)
 17. Kobeleva N.N. *Metodicheskie osobennosti postroeniya prognoznnykh matematicheskikh modeley dlya izucheniya deformatsiy vysokikh plotin* [Methodical features of construction of predictive mathematical models for the study of deformations of high dams]. *Vestnik SGUGiT*. 2017. Vol. 22, No. 2. Pp. 55–63. (in Russian)
 18. Aleksandrov Y.N. Temperature conditions in the first column of the Sayano-Shushenskaya HPP dam from field observation data. *Power Technology and Engineering*. 2016. T. 50, No. 2. Pp. 130–141.
 19. Ardito R., Maier G., Massalongo G. Diagnostic analysis of concrete dams based on seasonal hydrostatic loading. *Engineering Structures*. 2008. No. 30. Pp. 3176–3185.
 20. Khrapkov A.A., Skvortsova A.E., Kostylev V.S., Shcherba D.V. *O postroenii matematicheskoy modeli arochno-gravitatsionnoy plotiny Sayano-Shushenskoy GES* [About the construction of a mathematical model of the arch-gravity dam of the Sayano-Shushenskaya HPP]. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B.E. Vedeneeva* [News of the All-Russian Vedeneev Hydraulic Engineering Research Institute]. 2011. Vol. 264. Pp. 56–69. (in Russian)
 21. Kostylev V.S. Use of mathematical «structure-bed» model to analyze changes in kinematic indicators of the concrete arch-gravity dam at the Sayano-Shushenskaya HPP from 2004 through 2012. *Power Technology and Engineering*. 2013. Vol. 47, No. 3. Pp. 191–199.
 22. Perner F., Obernhuber P. Analysis of arch dam deformations. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*. 2010. Vol. 4, Iss. 1. Pp. 102–108.
 23. Mata J., Castro A.T., Costa J. Constructing statistical models for arch dam deformation. *Structural Control and Health Monitoring*. 2014. Vol. 21, Iss. 35. Pp. 423–437.

24. Gulyaev Yu.P., Khoroshilov V.S., Lisitskiy D.V., Kobeleva N.N. Prognozirovaniye protsessa peremeshcheniy plotiny Sayano-Shushenskoy GES na etape ekspluatatsii 2007–2009 godov [Prediction of the movement process of the Sayano-Shushenskaya HPP dam during operation in 2007–2009]. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka* [Izv. Universities. Geodesy and aerial photography]. 2015. No. 5. Pp. 23–28. (in Russian)
 25. Khoroshilov V.S., Kobeleva N.N., Gubonin P.N. Matematicheskoe modelirovaniye deformatsionnogo protsessa dlya izucheniya peremeshcheniy plotiny Sayano-Shushenskoy GES na osnove dinamicheskoy modeli (2004–2007 gg.) [Mathematical modeling of the deformation process for studying the movements of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant dam based on the dynamic model (2004–2007)]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 2. Pp. 49–58. (in Russian)
 26. Box J., Jenkins G. *Analiz vremennykh ryadov. Prognoz i upravlenie* [Analysis of time series. Prediction and control]. Moscow, 1974. Iss. 1. 405 p. Iss. 2. 197 p. (in Russian)
-

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА



УДК 621.878:624.132.345

В.Н. КУЗНЕЦОВА, В.В. САВИНКИН

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ГИДРОПРИВОДА ЭКСКАВАТОРА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ

Технологические возможности одноковшового экскаватора зависят от мощности силовой установки, вида рабочего оборудования, вместимости ковша и системы его привода. Показателями эффективности работы экскаватора являются производительность, КПД гидропривода, затрачиваемая мощность на единицу объема разрабатываемого грунта, экономичность, минимальное время рабочего цикла и состояние гидропривода. В статье представлены результаты исследований внутренней энергии гидропривода, понимание которой интерпретировалось через принцип распределения мощности гидропривода и силовой установки. Установлены наиболее энергоемкие операции, вызывающие перенапряжение элементов силовой установки и гидропривода. Предложенная научная концепция повышения энергоэффективности одноковшового экскаватора через перераспределение мощности позволила расширить базу знаний в области эффективности эксплуатации землеройных машин.

К л ю ч е в ы е с л о в а: одноковшовый экскаватор, энергоэффективность, мощность, гидропривод, энергоемкость.

В процессе исследования энергоэффективности копания грунта экскаватор рассматривался как сложная иерархическая система, включающая основные подсистемы: силовую установку, рабочее оборудование и гидропривод. При эксплуатации экскаватора гидропривод должен обеспечить мощность, достаточную для преодоления всех сопротивлений, возникающих в исполнительных механизмах при энергонапряженных режимах копания. При этом наибольшая часть силы копания расходуется на резание грунта и перемещение собственных масс. Таким образом, сопротивление грунта резанию доминирует в составе суммарного рабочего сопротивления землеройных машин [1–4]. При выполнении земляных работ возможно повторно использовать энергию потока рабочей жидкости и эффективно перераспределять мощность по элементам экскаватора в соответствии с энергоемкостью операций. Следовательно, цель исследований заключается в оптимизации эксплуатации

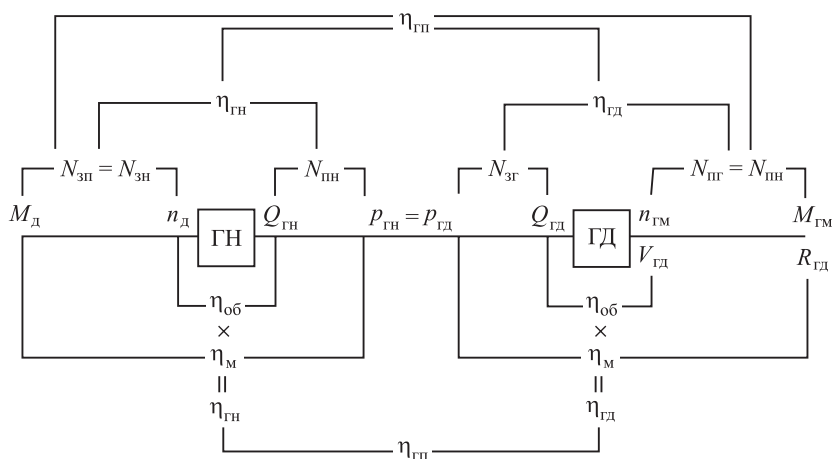


Рис. 1. Энергетическая структура объемного гидропривода

онных и технологических параметров систем одноковшового экскаватора, влияющих на снижение энергоемкости процессов.

Один из основных показателей эффективности работы гидропривода – его КПД. Произведение КПД гидромашин, или отношение полезной мощности гидропривода (гидродвигателя) к затрачиваемой мощности гидропривода (насоса), характеризует КПД гидропривода в целом. Рассмотрим энергетическую структуру гидропривода с учетом основных элементов системы (рис. 1).

Энергетическая структура объемного гидропривода описана с учетом следующих параметров: ГН и ГД – гидронасос и гидродвигатель; M_d и n_d – момент и частота вращения вала гидронасоса; $Q_{гн}$ и $P_{гн}$ – подача и давление на выходе гидронасоса; $Q_{гд}$ и $P_{гд}$ – расход и давление на выходе гидродвигателя; $M_{гм}$ и $n_{гм}$ – крутящий момент и частота вращения вала гидромотора; $R_{гц}$ и $V_{гц}$ – сила и скорость перемещения штока гидроцилиндра; $N_{зн}$ и $N_{пн}$ – затрачиваемая и полезная мощности гидронасоса соответственно; $N_{зг}$ и $N_{пг}$ – затрачиваемая и полезная мощности гидродвигателя соответственно; $N_{зп}$ и $N_{пп}$ – затрачиваемая и полезная мощности гидропривода соответственно; $\eta_{об}$ и η_m – объемный и механический КПД гидромашин; $\eta_{гн}$ и $\eta_{гд}$ – общий КПД гидронасоса и гидродвигателей; $\eta_{гп}$ – КПД гидропривода.

Математическая модель процесса копания грунта (внедрение, подъем и опускание) [5] позволила установить наиболее энергоемкую операцию в разных точках позиционирования рабочего оборудования. По результатам теоретических исследований [4–6] обнаружено, что в динамической модели рабочего оборудования экскаватора наиболее сложными для интерпретации являются энергонапряженные переходные процессы. Исследование процесса изменения мощностных и силовых характеристик гидропривода позволит обосновать закономерность распределения внутренней энергии по его гидроэлементам в соответствии с выполняемой работой, формирующей удельную энергоемкость процесса копания.

Значит, управляя траекторией движения оборудования на основе эффективного перераспределения мощности, можно изменять энергоемкость процесса копания, а следовательно, и адаптировать его к удельным затратам. Как ранее отмечено, важным показателем эффективности работы экскавато-

ра является удельная мощность гидропривода на единицу вместимости ковша. Поэтому с целью проектирования рабочего оборудования получена зависимость между геометрическими параметрами ковша экскаватора и мощностными характеристиками гидропривода

$$B_k = 0,930 \sqrt[3]{N_{\text{ном}}^{\text{гп}}} - 1,211,$$

где B_k – ширина ковша;

$N_{\text{ном}}^{\text{гп}}$ – номинальная мощность гидропривода.

Таким образом, геометрия ковша определяет условия энергоэффективной работы гидроцилиндров рабочего оборудования, а также предопределяет технические и технологические параметры гидропривода и его элементов при наполнении грунтом.

В исследованиях [2] выполняемая экскаватором работа интерпретируется через силовые характеристики гидроцилиндра, зависящие от давления в гидроприводе. Значит, необходимо установить зависимости между основными параметрами экскаватора при взаимодействии с разрабатываемым грунтом.

На рис. 2 представлены установленные функциональные зависимости производительности от мощности гидропривода $\Pi_3 = 0,441 + 26,13 N_{\text{гп}} - 87,14$

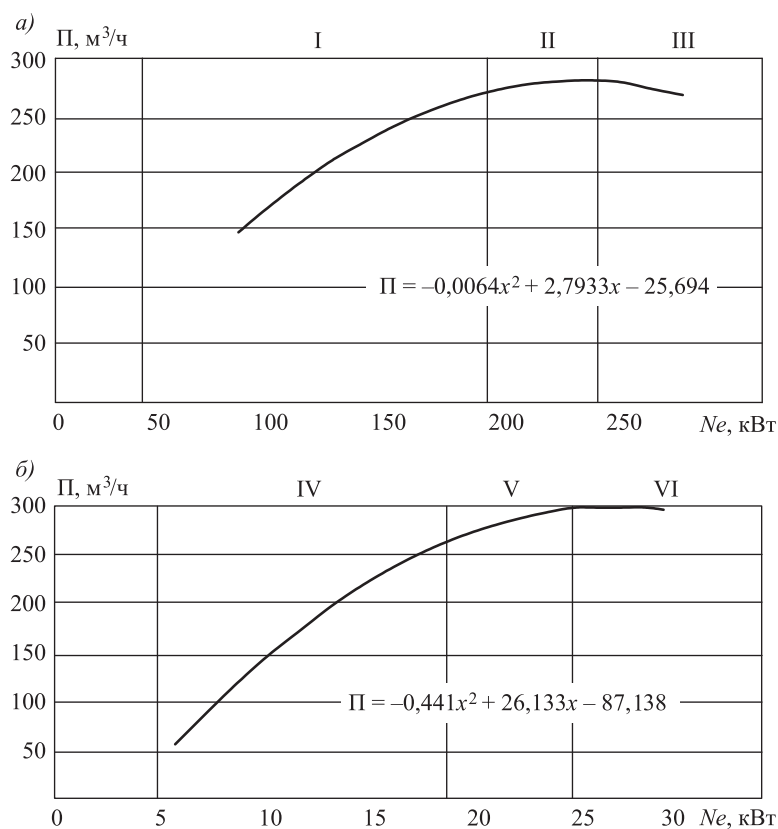


Рис. 2. Графики зависимости производительности экскаватора от затрачиваемой мощности двигателя (а) и гидропривода (б)

I – зона неэффективного использования мощности N_e ; II – зона эффективной мощности N_e ; III – зона снижения крутящего момента; IV – зона возможного увеличения производительности; V – зона постоянной производительности; VI – зона снижения производительности

и мощности двигателя $\Pi_3 = 0,0064 Ne^2 + 2,79 Ne - 25,694$. При анализе зависимости установлено, что сила копания ковшем возрастает до значений $R_k = 200\text{--}230$ кН и пропорциональна мощности гидропривода $N_{гп} = 21\text{--}25$ кВт. Взаимодействие силовой установки и гидропривода обеспечивает производительность экскаватора $\Pi_3 = 280$ м³/ч, соответствующую оптимальным энергетическим затратам.

Анализируя график (рис. 2, б), установлено, что зона I, характеризующая увеличение производительности Π , соответствует энергонапряженному режиму работы гидропривода. Зона II описывает установившийся режим постоянной производительности при эффективном использовании мощности гидропривода $N_{гп}$. Далее наблюдается увеличение затрачиваемой мощности гидропривода, однако в реальных условиях эксплуатации происходит снижение производительности, что характеризует диапазон неэффективного использования мощности.

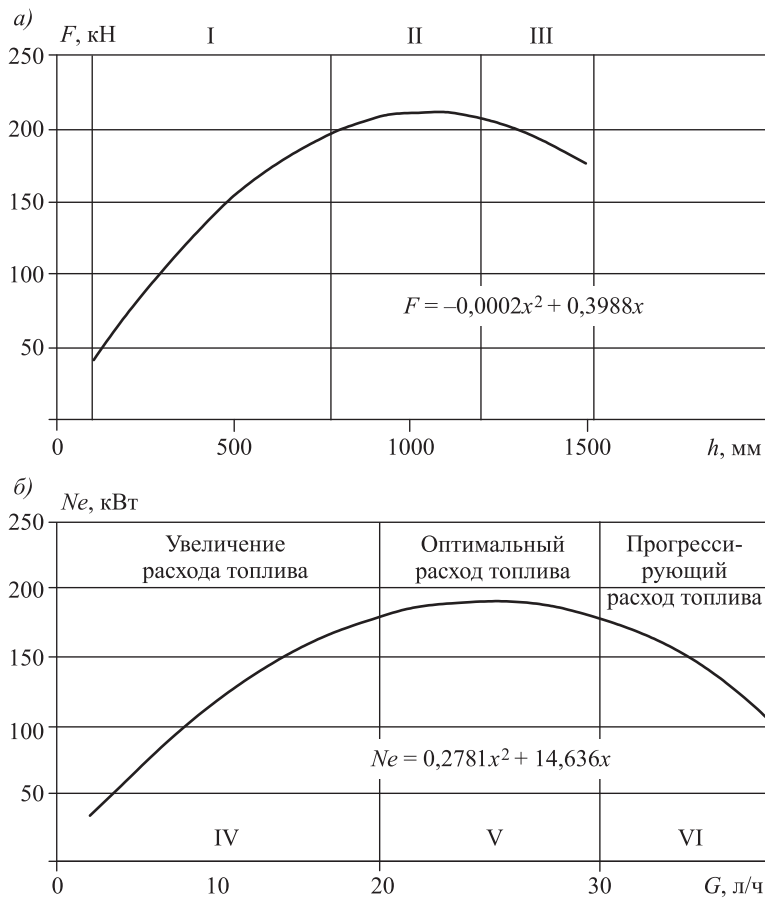


Рис. 3. Зависимости основных технологических параметров экскаватора от силовых и мощностных характеристик его систем
а – зависимость силы от хода штока гидроцилиндра; б – зависимость мощности от расхода топлива при различных режимах работы двигателя
I – этап внедрения ковша в грунт; II – этап отрыва грунта; III – этап выемки грунта из забоя; IV – этап увеличения затраченной энергии гидропривода на внедрение ковша в грунт; V – этап наполнения ковша и отрыв грунта; VI – этап выемки ковша с грунтом

Зависимость изменения силы копания F (рис. 3, а) от длины выхода штока гидроцилиндра ковша показывает, что энергия, затраченная на внедрение ковша в грунт (I этап) $E_{\text{в}}$, составляет 288 кДж · с. Последующие технологические операции, отрыв и выемка грунта, осуществляются при $E_{\text{о}} = 126$ кДж · с и $E_{\text{вг}} = 288$ кДж · с соответственно. Таким образом, наиболее энергоемкой операцией процесса копания является внедрение ковша в грунт (I этап). Следовательно, полученные результаты исследований основных технологических параметров экскаватора подтверждают гипотезу об эффективности перераспределения мощности гидропривода в соответствии с энергоемкостью процесса копания.

По результатам исследования разработана номограмма изменения мощностных характеристик гидропривода $N_{\text{гп}}$ и силовой установки Ne от реакции силы копания $F_{\text{ковш}}$ при различных положениях ковша $S_{\text{п.гц.к}}$ (рис. 4).

Из номограммы (рис. 4) видно, что максимальные значения мощности гидропривода $N_{\text{гп}} = 35\text{--}42$ кВт и двигателя $Ne = 102\text{--}105$ кВт достигаются

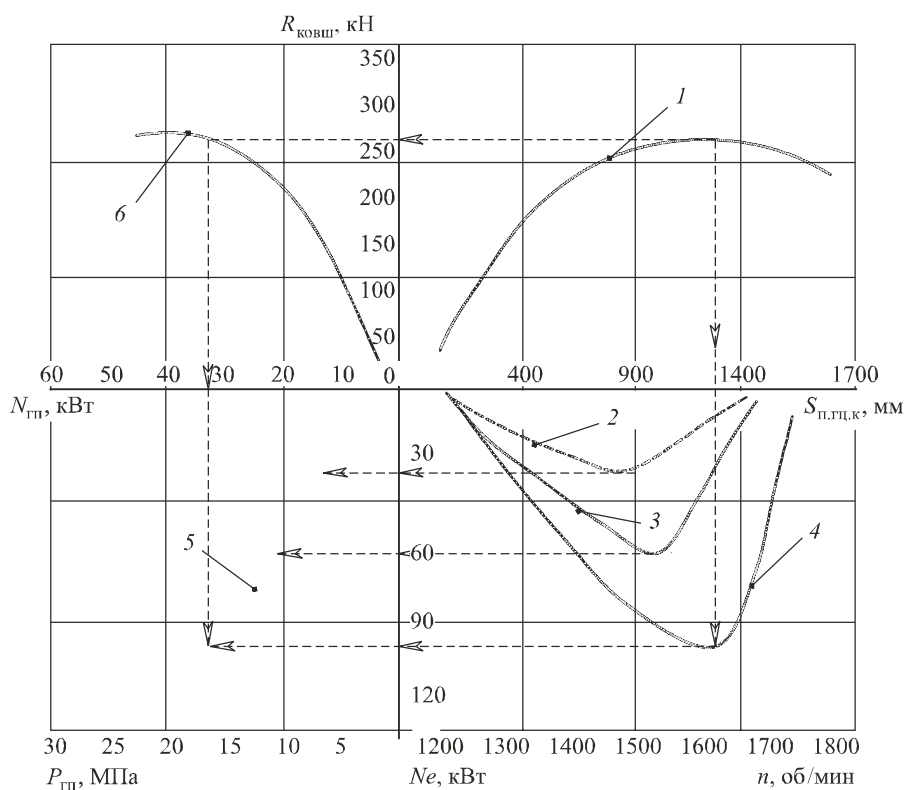


Рис. 4. Номограмма для определения зависимости измененных мощностных характеристик гидропривода $N_{\text{гп}}$ и силовой установки Ne от силы копания $F_{\text{ковш}}$ при разных положениях ковша $S_{\text{п.гц.к}}$

1 – кривая зависимости силы копания $R_{\text{ковш}}$ от хода поршня $S_{\text{п.гц.к}}$ (положение ковша); 2 – кривая зависимости мощности двигателя Ne от частоты вращения коленчатого вала n при передвижении экскаватора; 3 – кривая зависимости мощности двигателя Ne от частоты вращения коленчатого вала n при повороте платформы; 4 – кривая зависимости мощности двигателя Ne от частоты вращения коленчатого вала n при работе рабочим оборудованием; 5 – кривая зависимости давления гидропривода $P_{\text{гп}}$ от мощности двигателя Ne ; 6 – кривая зависимости мощности гидропривода $N_{\text{гп}}$ от силы копания $R_{\text{ковш}}$

при эксплуатации рабочего оборудования экскаватора (кривая 4). Номинальная мощность обеспечивает устойчивый режим работы оборудования при давлении гидропривода $P_{гп} = 17,5$ МПа и оборотах коленчатого вала $n = 1680$ об./мин. Пик нагрузок наблюдается при выходе штока гидроцилиндра ковша в пределах $S_{п.гц.к} = 900\text{--}1350$ мм (кривая 1), что характеризует положение ковша в момент внедрения в грунт.

После внедрения следуют операции «отрыв» и «выемка» грунта, которые сопровождаются значительным снижением мощности двигателя до $Ne = 65$ кВт и гидропривода $N_{гп} = 21$ кВт. При этом наблюдается увеличение хода поршня $S_{п.гц.к} = 1700$ мм (кривая 1) и снижение силы копания до 95 кН, что соответствует положению ковша, наполненного грунтом. Из номограммы (кривые 4, 5 и 6) видно, что энергоемкость процесса высока только при внедрении ковша в грунт. Вторая и третья части операции (поворот и выемка) требуют меньших затрат энергии, однако силовая установка и гидропривод работают практически на тех же высоконагруженных режимах (см. рис. 3). Таким образом, перераспределение мощности силовой установки и гидропривода в соответствии с энергоемкостью операций экскавации позволит повысить эффективность работы экскаватора. Для обеспечения адекватной оценки принципа распределения мощности гидропривода и силовой установки в зависимости от рабочих операций построена гистограмма распределения мощности (рис. 5).

Последовательность операций технологического процесса копания (рис. 5) представлены в следующей очередности: 1 – разгон, поворот платформы с рабочим оборудованием к забою и торможение; 2 – опускание рабочего оборудования в забой; 3 – поворот ковша к грунту; 4 – внедрение зубьев и режущей кромки ковша в грунт; 5 – резание грунта и наполнение ковша; 6 – выемка загруженного ковша из забоя; 7 – подъем оборудования с загруженным ковшом; 8 – разгон, поворот и торможение платформы, перемещение оборудования; 9 – выгрузка ковша.

Исследования показали, что величина энергоемкости разработки грунтов землеройными машинами зависит не только от физико-механических свойств грунта, но и от конструктивных особенностей, схем включения гидроэлементов, мощностного баланса, а также изменения начальных параметров гидропривода в процессе эксплуатации.

Закключение. 1. Обоснованы оптимальные соотношения между параметрами гидропривода и силовой установки экскаватора при выполнении технологических операций, позволяющие снизить энергоемкость рабочего процесса экскаватора. Установлены функциональные зависимости мощностных, силовых и эксплуатационных характеристик при разработке грунта, обеспечивающие получение новых результатов оценки и обоснования эффективности протекания технологического процесса работы одноковшового экскаватора.

2. Использование 50–60 % полезной мощности гидропривода в технологическом процессе свидетельствует о значительном резерве повышения потенциала экскаватора. Полезная мощность (энергия) обосновывает выбор рациональных режимов работы экскаватора, в том числе с учетом произво-

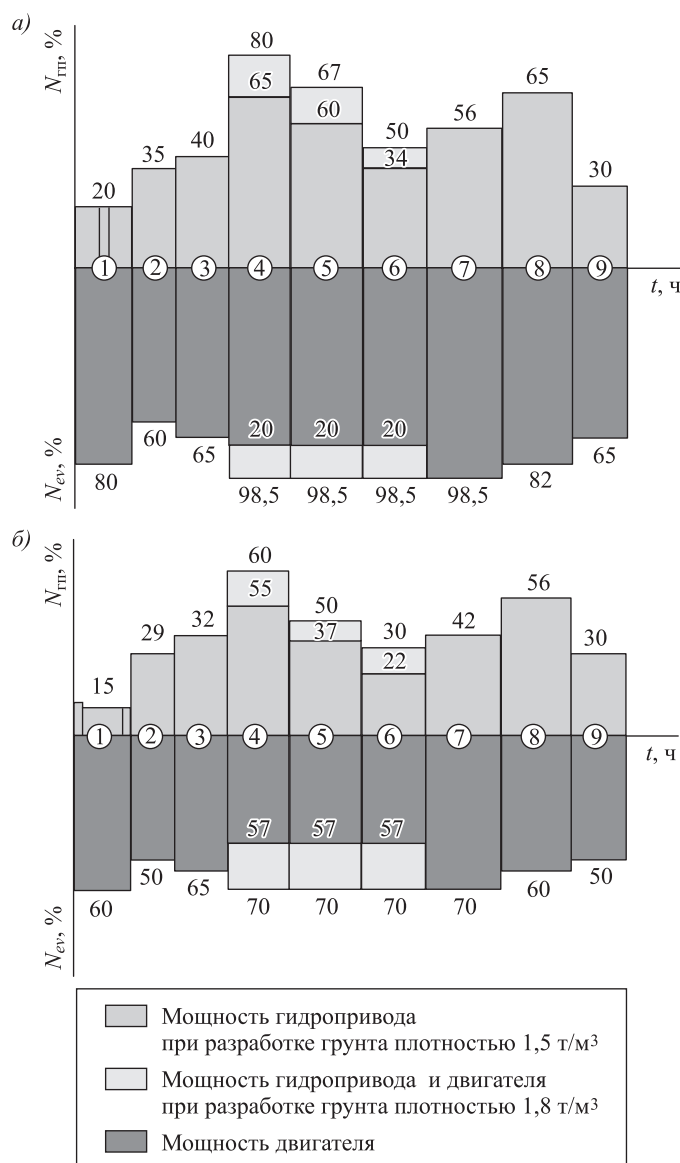


Рис. 5. Фактическое (а) и предлагаемое (б) распределение мощности гидропривода и силовой установки
 $N_{ев}$ – мощность, затрачиваемая двигателем; $N_{гп}$ – мощность, затрачиваемая гидроприводом

длительности, соответствующей энергетическим затратам на единицу объема разрабатываемого грунта.

3. Применительно к проблематике исследований раскрыты противоречия и несоответствия технологических параметров экскаватора с энергоэффективностью функционирования его систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Кузнецова В.Н. Развитие научных основ взаимодействия контактной поверхности рабочих органов землеройных машин с мерзлыми грунтами: Дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2009. 259 с.

2. Савинкин В.В. Развитие теории энергоэффективности одноковшового экскаватора: Дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2016. 390 с.
3. Lee S.U., Chang P.H. Control of a heavy-duty robotic excavator using time delay control with integral sliding surface // Control Engineering Practice. 2002. Vol. 10, No. 7. P. 697–711.
4. Кузнецова В.Н., Савинкин В.В. Обоснование критериев оценки эффективности экскаватора KOMATSU PC300 // Строит. и дорож. машины. 2014. № 3. С. 9–12.
5. Кузнецова В.Н., Савинкин В.В. Исследование энергоемкости экскавационного цикла землеройной машины // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 8. С. 60–68.
6. Seward D., Pace C., Morrey R., Sommerville I. Safety analysis of autonomous excavator functionality // Reliability Engineering & System Safety. 2000. Vol. 70, No. 1. P. 29–39.

Кузнецова Виктория Николаевна, д-р техн. наук, проф.

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

Савинкин Виталий Владимирович, д-р техн. наук, доц.

Северо-Казахстанский государственный университет им. М. Козыбаева, г. Петропавловск, Казахстан

Получено 04.05.18

Kuznetsova Viktoriya Nikolaevna, DSc, Professor

Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

Savinkin Vitaliy Vladimirovich, DSc, Ass. Professor

North Kazakhstan State University named after M. Kozybaev, Petropavlovsk, Kazakhstan

INVESTIGATION OF POWER DISTRIBUTION OF POWER UNIT OF THE EXCAVATOR HYDRAULIC DRIVE IN THE IMPLEMENTATION OF CONSTRUCTION WORKS

Technological capabilities such digger is the excavator, depend on the power of the power plant, the type of work equipment, bucket capacity and drive systems. Performance indicators are excavator productivity, efficiency hydraulic drive expended power per unit volume of soil being developed, cost, minimal cycle times and state of the hydraulic drive. The article presents the results of the hydraulic drive of the internal energy research, which has been interpreted through an understanding of the power distribution principle of the hydraulic drive and the power plant. Established the most energy-intensive operation, causing overvoltage elements of the power plant and the hydraulic drive. Proposed the scientific concept of energy efficiency increase shovel capacity through redistribution allowed to expand the knowledge base in the field of efficiency of operation of earthmoving machinery.

Key words: shovel, energy efficiency, power, hydraulic, power consumption.

REFERENCES

1. Kuznetsova V.N. Razvitie nauchnykh osnov vzaimodeystviya kontaktnoy poverkhnosti rabochikh organov zemleroynykh mashin s merzlymi gruntami: Dis. ... doktora tekhnicheskikh nauk [Development of scientific bases of interaction of the contact surface of the working bodies of earth-moving machines with the frozen soil: Doctor's thesis]. Omsk, 2009. 259 p. (in Russian)

2. Savinkin V.V. Razvitie teorii energoeffektivnosti odnokovshovogo ekskavatora: Dis. ... doktora tekhnicheskikh nauk [Development of energy efficiency theory shovel: Doctor's thesis]. Omsk, 2016. 390 p. (in Russian)
 3. Lee S.U., Chang P.H. Control of a heavy-duty robotic excavator using time delay control with integral sliding surface. Control Engineering Practice. 2002. Vol. 10, No. 7. Pp. 697–711.
 4. Kuznetsova V.N., Savinkin V.V. Obosnovanie kriteriev otsenki effektivnosti ekskavatora KOMATSU PC300 [Justification criteria for evaluating the effectiveness of the excavator KOMATSU PC300]. Stroitel'nye i dorozhnye mashiny [Building and road machines]. 2014. No. 3. Pp. 9–12. (in Russian)
 5. Kuznetsova V.N., Savinkin V.V. Issledovanie energoemkosti ekskavatsionnogo tsikla zemleroy noy mashiny [Research of power consumption of an excavation cycle of the digging car]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2014. No. 8. Pp. 60–68. (in Russian)
 6. Seward D., Pace C., Morrey R., Sommerville I. Safety analysis of autonomous excavator functionality. Reliability Engineering & System Safety. 2000. Vol. 70, No. 1. Pp. 29–39.
-

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ, ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКОЛОГИИ



УДК 725.38

Н.А. АНУФРИЕВА

ИНФРАСТРУКТУРНОЕ РАЗВИТИЕ ПРИГРАНИЧНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПОСТОВ

Рассмотрено инфраструктурное формирование приграничных автомобильных постов на основе пропускной способности предприятий. Уровень инфраструктурного развития комплексных предприятий в зоне приграничных транспортных узлов складывается за счет мощностей предприятий, входящих в их состав. Исследование показывает степень необходимого инфраструктурного развития постов для различных по мощности предприятий, определяет укрупненный инфраструктурный состав, перечень предприятий. Выявлены мощности, требующие переход на систему «автопорт». Дано определение термину «автопорт». Рассмотрен инфраструктурный состав предприятий мощностью до 500 и 2000 автомобилей в сутки и более.

Ключевые слова: инфраструктурное развитие, комплексные предприятия приграничного транспортного узла, автопорт.

В основе развития предприятий, рассчитанных на комплексный подход в реализации функциональных потребностей и возможностей региона, лежит особый принцип развития экономического пространства [1–4]. К подобным комплексным предприятиям относится приграничный автомобильный пост (ПАП). Векторы регионального развития выявляют перспективный диапазон инфраструктурного развития ПАП по РФ с учетом типа размещения постов относительно населенных пунктов [5–7]. На формирование инфраструктуры ПАП влияет мощность объекта, так как это связано с функциональной потребностью. В процессе исследования определены основные модели инфраструктурного развития ПАП в зонах транспортных узлов с учетом пропускной способности.

Государственными программами стратегического развития РФ определены мероприятия по глобализации регулирования миграционных и транспортных потоков по территории РФ и за ее пределами автомобильным транспортом^{1,2} [8]. Анализ инфраструктурного развития ПАП по границе РФ

¹ О Концепции реализации государственной политики в сфере обустройства государственной границы Российской Федерации: распоряжение Правительства РФ от 11 сент. 2008 г. № 1309-р // СЗ РФ. 2008. № 32. Ст. 4334.

² Об утверждении общих требований к строительству, реконструкции, оборудованию и техническому оснащению зданий, помещений и сооружений, необходимых для пограничного, таможенного и иных видов контроля, осуществляемого в пунктах пропуска через государственную границу Российской Федерации: Постановление Правительства РФ от 25 дек. 2007 г. № 930 // СЗ РФ. 2008. № 53. Ст. 6626.

учитывает процессы перспективного развития таможенно-пограничных постов. Модели перспективного инфраструктурного развития ПАП представлены с учетом пропускной способности. Каждая из моделей устанавливает минимальный набор инфраструктурного развития, характерный пропускной способности объекта. Для каждой группы ПАП определены принципы и приемы архитектурно-пространственной организации. На всех ПАП учитывается принцип организации пространства за счет инфраструктурного развития [8, 9].

Инфраструктурная модель ПАП – это архитектурно-планировочная модель, отражающая устойчивое развитие особых признаков для выделения определенного типа комплекса, его фрагмента или здания в зависимости от условий формирования. При выявлении и построении инфраструктурной модели дифференцируется требуемая типология инфраструктуры. Инфраструктурное развитие ПАП пропускной способностью 50 автомобилей в сутки существенным образом отличается от инфраструктурного развития ПАП 2000 автомобилей в сутки. Параллельное региональное формирование ПАП будет сопровождаться особыми условиями расположения комплексного предприятия в структуре РФ, экономическим и инфраструктурным развитием региона и приграничной страны [10, 11].

Инфраструктурное развитие ПАП пропускной способностью до 500 автомобилей в сутки. В исследовании перспективного инфраструктурного формирования ПАП рассматриваются автономный и периферийный типы размещения ПАП, локальная схема компоновки объектов [6]. По границе РФ ПАП данной мощностью является самым многочисленным типом, их насчитывается 59 постов. Для ПАП пропускной способностью до 500 автомобилей в сутки характерен первый уровень инфраструктурной организации, требуется инфраструктурное развитие большей части данных ПАП. Анализ показал, что для более полной демонстрации инфраструктурного развития, ПАП пропускной способностью до 500 автомобилей в сутки необходимо разбить на 4 группы, автомобилей в сутки:

1. 50–100;
2. 100–500;
3. 350–500;
4. 400–500.

Каждую группу ПАП характеризуют индивидуальные показатели, площади участков, показатели площади объектов инфраструктуры, в зависимости от ее функционального насыщения.

На ПАП мощностью 50–100 автомобилей в сутки при перспективном инфраструктурном развитии необходима частичная замена или реконструкция основного здания автомобильного пункта пропуска (АПП) и дополнительно – ввод безоператорной АЗС автоматизированного типа. Требуется установка типовых стел-указателей страны въезда (Россия). Архитектурное решение АПП и АЗС формируется по принципу модульности с применением типовых блок-модулей заводского изготовления или проектных блок-модулей, со сборкой на месте установки. Используемые приемы построения архитектурного пространства: создание типового модуля (типовые АПП-модули, автоматизированные АЗС), информационной среды (знаки дорожного движения, указатели, стелы), использование полукрытых пространств (частично) (рис. 1).

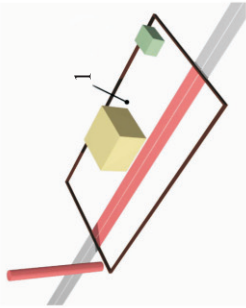
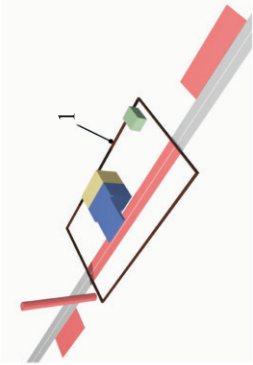
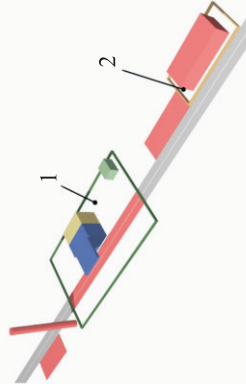
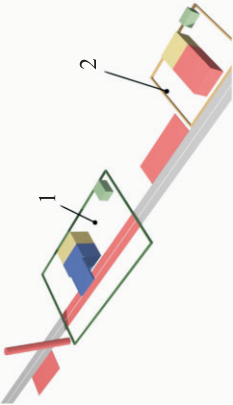
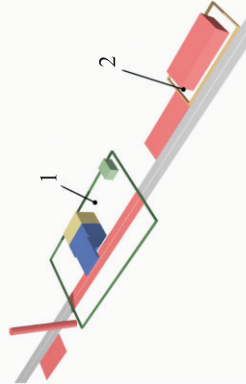
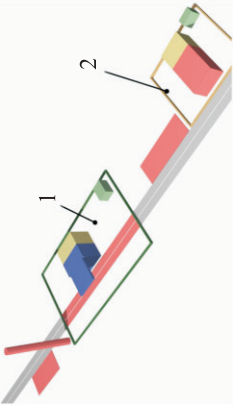
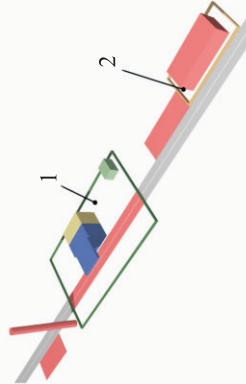
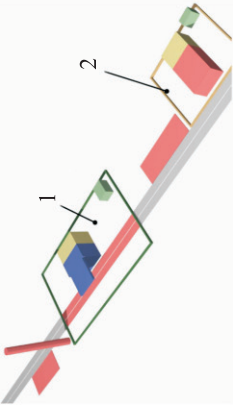
Инфраструктурная модель		Уровень	Объекты ПАП	Инфра-структура			
		Зеленый	1 - АПП (автомобильный пункт пропуска)				
			1.1 стена				
			1.2 автопарковки (с двух сторон АПП)				
			1.3 автономный источник энергообеспечения				
			1.4 проезды				
		Желтый	1.5 здание служб (одностороннее)				
			1 - АПП (автомобильный пункт пропуска)				
			1.1 стена				
			1.2 автопарковки (с двух сторон АПП)				
			1.3 автономный источник энергообеспечения				
		Черный	1.4 проезды				
			1.5 здание служб				
			2 КПС				
			2.1 АЗС (блочная)				
			2.2 АЗС (комплексная)				
		Белый	2.3 автономный источник энергообеспечения				

Рис. 1. Инфраструктурные модели ПАП пропускной способностью 50–100 автомобилей в сутки

На некоторых ПАП, мощностью 100–500 автомобилей в сутки, при перспективном инфраструктурном развитии требуется замена или реконструкция основного здания АПП и дополнительно – ввод АЗС комплексного типа (операторная, розничная торговля, кафе, санитарные помещения в планировочном решении АЗС), необходимо устройство парковки у въезда на АПП с двух сторон. Требуется установка индивидуальных стел-указателей страны въезда (Россия). Архитектурно-пространственная организация АПП и АЗС формируется по принципу модульности с помощью блок-модулей заводского изготовления или проектных блок-модулей, со сборкой на месте установки. Используемые приемы построения архитектурного пространства: создание типового модуля (типовые АПП-модули, КПП, АЗС), информационной среды (знаки дорожного движения, указатели, стелы), использование полукрытых пространств, создание урбанизированной среды (рис. 2).

На ПАП, мощностью 350–500 автомобилей в сутки включительно, при перспективном инфраструктурном развитии требуется замена или реконструкция основного здания АПП (при необходимости) и дополнительно – ввод АЗС комплексного типа (операторная, розничная торговля, кафе, санитарные помещения в планировочном решении АЗС), необходимо устройство парковки у въезда на АПП с двух сторон. При выполнении данных мероприятий уровень организации ПАП будет «Сервисный». При необходимости устройства таможенно-логистических терминалов (ТЛТ) или уже сформированном третьем «Таможенно-логистическом» уровне организации ПАП, при локальной схеме группировки объектов, есть необходимость в расширении зоны комплекса придорожного сервиса (КПС) за счет введения объекта общественного питания (кафе) на 10–15 мест и небольшой гостиницы на 5–10 номеров. Требуется установка индивидуальных стел-указателей страны въезда (Россия). Архитектурно-пространственная организация АПП, КПС и ТЛТ может формироваться по принципу модульности, с применением блок-модулей заводского изготовления или проектных блок-модулей, со сборкой на месте установки, а может быть выполнено с учетом индивидуального решения и природной среды (особого зонального типа) при расположении автономно или периферийно с учетом среды населенного пункта. Используемые приемы построения архитектурного пространства: создание типового модуля (типовые АПП-модули, контрольно-пропускные пункты, АЗС), информационной среды (знаки дорожного движения, указатели, стелы), использование полукрытых пространств, создание урбанизированной среды (рис. 3).

На ПАП, мощностью 400–500 автомобилей в сутки, при перспективном инфраструктурном развитии требуется замена или реконструкция основного здания АПП (при необходимости) и дополнительно – ввод АЗС комплексного типа (операторная, розничная торговля, кафе, санитарные помещения в планировочном решении АЗС), необходимо устройство парковки у въезда на АПП с двух сторон. При выполнении данных мероприятий уровень организации ПАП будет «Сервисный». При необходимости устройства ТЛТ или уже сформированном третьем «Таможенно-логистиче-

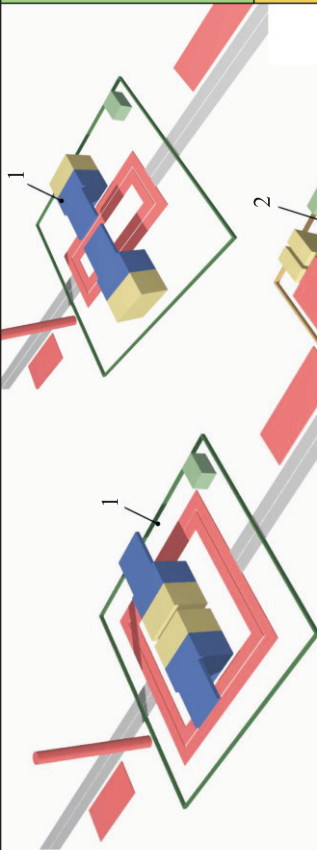
Инфраструктурная модель	Уровень	Объекты ПАП	Инфра- структура
	1	1 – АПП (автомобильный пункт пропуска)	
		1.1 стела	
		1.2 автопарковки (с двух сторон АПП)	
		1.3 автономный источник энергообеспечения	
		1.4 проезды	
		1.5 здание служб (двухстороннее)	
	2	1 – АПП (автомобильный пункт пропуска)	
		1.1 стела	
		1.2 автопарковки (с двух сторон АПП)	
		1.3 автономный источник энергообеспечения	
		1.4 проезды	
		1.5 здание служб	
		2 КПС	
		2.1 АЭС (комплексная: кафе+торговля)	
		2.2 автономный источник энергообеспечения	
		2.3 кафе (столовая)	
		2.4 гостиная	
		2.5 проезды	
		2.6 автопарковки	

Рис. 2. Инфраструктурные модели ПАП пропускной способностью 100–500 автомобилей в сутки

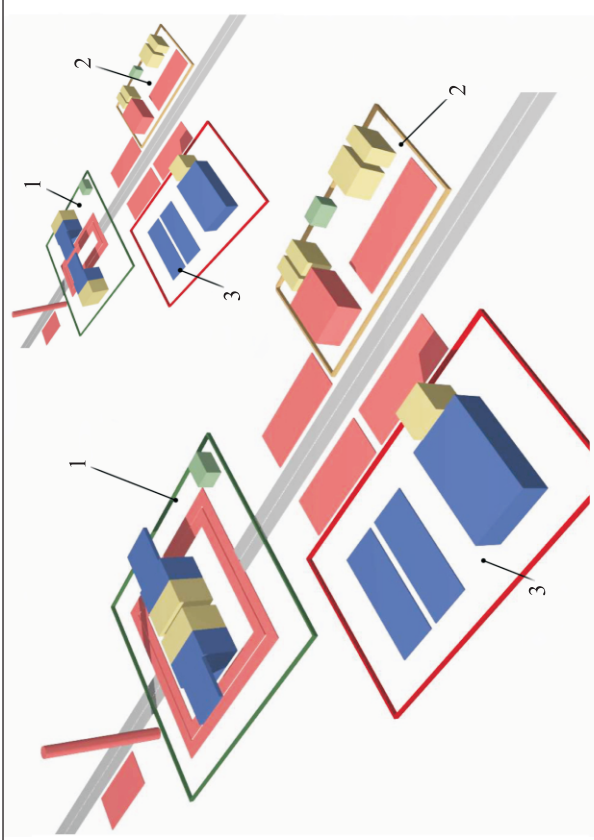
Инфраструктурная модель	Уровень	Объекты ПАП	Инфра- структура
		1 - АПП (автомобильный пункт пропуска)	
		1.1 стена	
		1.2 автопарковки (с двух сторон АПП)	
		1.3 автономный источник энергообеспечения	
		1.4 проезды	
		1.5 здание служб	
		2 КПС	
		2.1 АЗС (комплексная: кафе+торговля)	
		2.2 автономный источник энергообеспечения	
		2.3 кафе (столовая)	
		2.4 гостиница	
		2.5 проезды	
		2.6 автопарковки	
		3 ТЛП	
		3.1 АБК	
		3.2 Склад СВХ	
		3.3 площадки для хранения	
		3.4 проезды	
		3.5 автопарковки	
		3.6 автономный источник энергообеспечения	

Рис. 3. Инфраструктурные модели ПАП пропускной способностью 350–500 автомобилей в сутки

ском» уровне организации ПАП, при локальной схеме группировки объектов, есть необходимость в расширении зоны КПС за счет введения объекта общественного питания (кафе, столовая) на 10–20 мест и небольшой гостиницы на 10–15 номеров. Возможно устройство нескольких зон КПС меньшей мощности или организация единого блока КПС на максимальное число посадочных мест и номеров. Требуется установка индивидуальных стел-указателей страны въезда (Россия). Архитектурно-пространственная организация АПП, КПС и ТЛТ должна быть выполнена согласно индивидуальному решению с учетом природной среды (особого зонального типа) при расположении ПАП автономно или периферийно. Частично архитектурно-пространственная организация объектов ПАП может формироваться по принципу модульности, с применением блок-модулей заводского изготовления или проектных блок-модулей, со сборкой на месте установки (рис. 4) [9].

Модель инфраструктурного развития пропускной способностью более 2000 автомобилей в сутки. В исследовании перспективного инфраструктурного формирования ПАП рассматривается автономный, периферийный и интегрированный типы размещения ПАП, локальная схема компоновки объектов [6]. По границе РФ ПАП данной мощности насчитывается 13 постов. В настоящее время ПАП пропускной способностью более 2000 автомобилей в сутки характерен второй и третий уровень инфраструктурной организации, требуется повышение качества КПС на ПАП второго, третьего и четвертого уровней организации.

На ПАП, мощностью более 2000 автомобилей в сутки, при перспективном инфраструктурном развитии требуется реконструкция основного здания АПП (при необходимости) для обеспечения соответствия пропускной способности и дополнительно – строительство объектов КПС в составе:

- несколько АЗС комплексного типа (операторная, розничная торговля, кафе, наличие санитарных помещений в планировочном решении АЗС);
- парковки у въезда на АПП с двух сторон, парковки по территории АПП, площадки-парковки отстойников грузового автотранспорта и т.д.;
- введение нескольких объектов общественного питания (кафе, столовая) на 20–40 мест;
- несколько гостиниц на 10–20 номеров;
- автовокзал;
- розничная и оптовая торговля;
- аптеки;
- предприятия бытового обслуживания;
- филиалы банков;
- объекты связи и службы доставки;
- медицинские пункты;
- мойки, СТО.

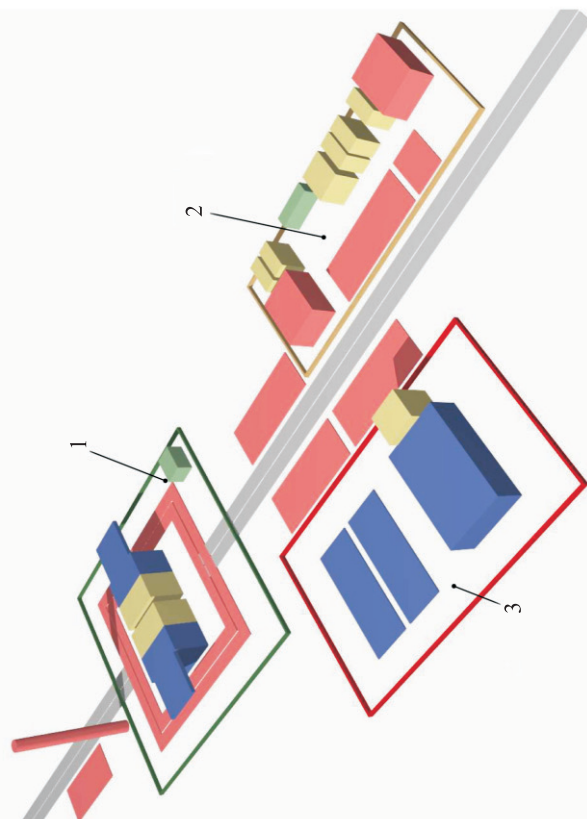
Инфраструктурная модель	Уровень	Объекты ПАП	Инфра-структура
		1 - АПП (автомобильный пункт пропуска)	
		1.1 стела	
		1.2 автопарковки (с двух сторон АПП)	
		1.3 автономный источник энергообеспечения	
		1.4 проезды	
		1.5 здание служб	
		2 КПС	
		2.1 АЗС (комплексная: кафе+торговля)	
		2.2 автономный источник энергообеспечения	
		2.3 кафе (столовая)	
		2.4 гостиница	
		2.5 проезды	
		2.6 автопарковки	
		2.7 СТО	
		2.8 торговля	
		3 ТЛП	
		3.1 АБК	
		3.2 Склад СВХ	
		3.3 площадки для хранения	
		3.4 проезды	
		3.5 автопарковки	
		3.6 автономный источник энергообеспечения	

Рис. 4. Инфраструктурные модели ПАП пропускной способностью 400–500 автомобилей в сутки

Необходимо устройство нескольких зон КПС с двух сторон автодороги в связи с загруженностью участка трассы при въезде на АПП. При выполнении данных мероприятий уровень организации ПАП будет полноценно соответствовать типу «Сервисный». При необходимости устройства ТЛТ или уже сформированном третьем «Таможенно-логистическом» уровне организации ПАП, при локальной схеме группировки объектов, есть необходимость в расширении зоны КПС. Требуется установка индивидуальных стел-указателей страны въезда (Россия). Архитектурно-пространственная организация АПП, КПС и ТЛТ должна быть выполнена по средствам индивидуального решения с учетом природной среды (особого зонального типа) при расположении ПАП автономно и периферийно или

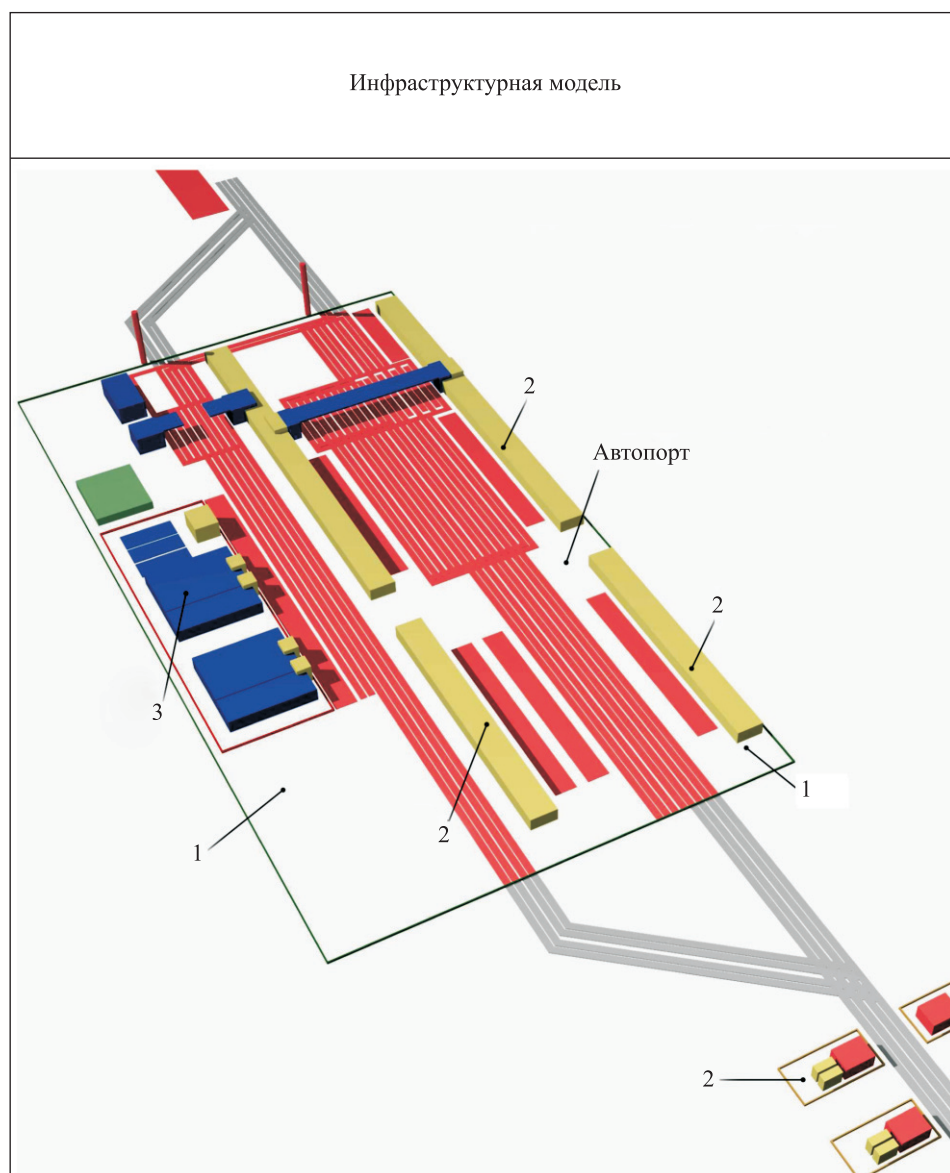


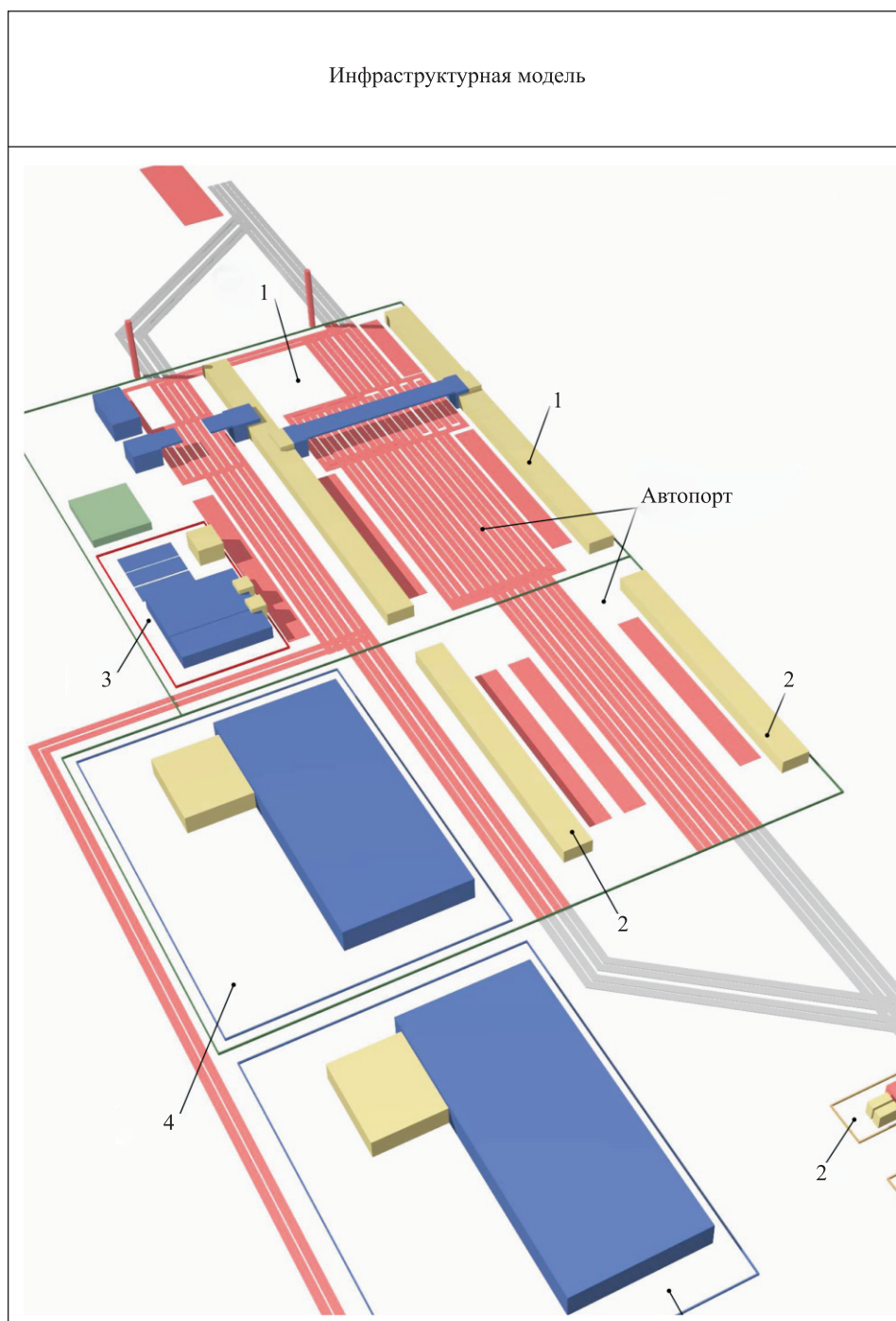
Рис. 5. Инфраструктурная модель ПАП пропускной способностью

интегрировано с учетом архитектурной среды населенного пункта. При особых условиях расположения (природная и городская среда) необходим учет принципа уникальности при разработке общего решения АПП и других объектов ПАП. Особое место в вопросе организации крупнейших АПП частного порядка занимает возможность создания объемно-планировочной модели по типу **автопорт. Автопорт** – новый технологически сложный и функционально насыщенный тип здания, комплекс, для обеспечения пересечения государственной границы РФ автомобильным транспортом.

Общее развитие инфраструктуры ПАП мощностью более 2000 автомобилей в сутки должно выполняться с учетом внедрения Концепции инфра-

Уровень	Объекты ПАП	Инфра- структура			
	1 - АПП (автомобильный пункт пропуска)				
	1.1 стела				
	1.2 автопарковки (с двух сторон АПП)				
	1.3 автономный источник энергообеспечения				
	1.4 проезды				
	1.5 здание служб (1)				
	1.6 здание служб (2)				
	2 КПС (1)				
	2.1 АЗС (комплексная: кафе+торговля)				
	2 КПС (2)				
	2.1 автономный источник энергообеспечения				
	2.2 кафе (столовая)				
	2.3 гостиница				
	2.4 проезды				
	2.5 автопарковки				
	2.6 торговля				
	2 КПС (3)				
	2.1 СТО				
	2.2 торговля				
	2.3 автономный источник энергообеспечения				
	2.4 проезды				
	2.5 автопарковки				
	2 КПС (4)				
	2.1 банки				
	2.2 автовокзал				
	2.3 торговля				
	2.4 офисы фирм				
	2.5 проезды				
	2.6 автопарковки				
	2. КПС (5)				
	2.1 медпункты				
	2.2 аптеки				
	3 ТЛТ				
	3.1 АБК				
	3.2 зона досмотра груза				
	3.3 площадки для хранения				
	3.4 проезды				
	3.5 автопарковки				
	3.6 автономный источник энергообеспечения				
	3.7 склады для хранения				
	3.8 офисы логистических предприятий и компаний				
	3.9 банки				
	3.10 кафе (столовые)				
	3.11 помещения для оживания и отдыха				

более 2000 автомобилей в сутки



структурного развития. Территорию ПАП необходимо разрабатывать с учетом общего комплексного планировочного решения при автономном расположении и включать в общий генплан города при нахождении периферийно или интегрированно. Требуется решение задач обустройства приграничной территории РФ зонами особого экономического назначения (СЭЗ). Вопросы расширения территории ПАП за счет включения зоны СЭЗ должны рас-

Уровень	Объекты ПАП	Инфра- структура			
	4 СЭЗ				
	4 СЭЗ (1)				
	4.1 розничная торговля				
	4.2 офисы предприятий				
	4.3 автономный источник энергообеспечения				
	4.4 проезды				
	4.5 парковки				
	4.6 гостиницы				
	4.7 кафе (столовые)				
	4.8 банки				
	4 СЭЗ (2)				
	4.1 оптовая торговля				
	4.2 логистические компании				
	4.3 офисы компаний				
	4.4 автономный источник энергообеспечения				
	4.5 проезды				
	4.6 парковки				
	4.7 гостиницы				
	4.8 кафе (столовые)				
	4.9 банки				
	4 СЭЗ (3)				
	4.1 мелкие производственные предприятия				
	4.2 АБК				
	4.4 проезды				
	4.5 парковки				
	4.8 кафе (столовые)				
	4.11 офисы компаний				
	4 СЭЗ (4)				
	4.1 средние производственные предприятия				
	4.2 АБК				
	4.3 офисы предприятий				
	4.4 проезды				
	4.5 парковки				
	4.6 гостиницы				
	4.7 банки				
	4.8 кафе (столовые)				
	4.9 склады логистических предприятий				
	4.10 офисы логистических компаний				
	4.11 офисы компаний				
	4 СЭЗ (5)				
	4.1 крупные производственные корпуса предприятий				
	4.2 склады предприятий				
	4.2 АБК				
	4.3 офисы предприятий				
	4.4 проезды				
	4.5 парковки				
	4.6 гостиницы				
	4.7 банки				
	4.8 кафе (столовые)				
	4.9 склады логистических компаний				
	4.10 офисы логистических компаний				
	4.11 офисы компаний				
	4.12 медпункты				
	4.13 АЗС (блочные)				

Окончание рис. 5

смагиваться в каждом случае индивидуально с учетом характерных особенностей СЭЗ (рис. 5).

В исследовании выявлено инфраструктурное развитие территорий ПАП с учетом основных типов ПАП по пропускной способности (мощности). Определены необходимые предприятия в составе ПАП пропускной способностью 500–2000 автомобилей в сутки и более.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В ы с о ц к а я Т.А., Л у б н е в Ю.П. Роль и место производственной инфраструктуры в региональном развитии // Технологии управления (Ростов н/Д). 2001. № 1.
2. В ы с о ц к а я Т.А. Пути развития транспортной системы как важнейшей составляющей производственной инфраструктуры региона // Технологии управления. 2002. № 2.
3. В ы с о ц к а я Т.А. Современные аспекты развития производственной инфраструктуры региона // Экономические проблемы России и региона: Учен. зап. / РГЭУ (РИНХ). Ростов н/Д, 2003. Вып. 8.
4. М е н ь ш и к о в С. Инфраструктуре нужна целостность // Экономика и жизнь. 1995. № 15.
5. И з а р д У. Методы регионального анализа: введение в науку о регионах / Пер. с англ. В.М. Хомана, Ю.Г. Липеца, С.Н. Тагера. М.: Прогресс, 1966. 660 с.
6. А н у ф р и е в а Н.А. Региональные модели инфраструктурного развития комплексных предприятий на границе РФ // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 10–11. С. 80–92.
7. А н у ф р и е в а Н.А. Особенности архитектурно-планировочной организации приграничных автомобильных постов // Архитектон: известия вузов. 2014. № 3.
8. К л ё с о в а С., Д р а н ё в Я.Н. и др. Практика экономического развития территории: опыт ЕС и России. М., 2011.
9. А н у ф р и е в а Н.А. Принципы организации архитектурного пространства транспортных узлов в приграничной зоне РФ // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 12. С. 82–91.
10. К и с е л е в В.С., Ж и р о в а О.Д. Развитие организационно-коммерческих услуг за рубежом. М.: ЦНИИТЭИМС, 1989.
11. К о в а л е в Н.Р. Региональная производственная инфраструктура: планирование и интенсификация. Владивосток: Дальневост. ун-т, 1987.

Ануфриева Надежда Анисимовна, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 10.05.18

Anufrieva Nadezhda Anisimovna, Ass. Professor

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

INFRASTRUCTURE DEVELOPMENT FRONTIER AUTOMOBILE POSTS

In article infrastructure forming of border automobile posts of FAP on the basis of the flow capacity of the enterprises is considered. Level of infrastructure development of the complex enterprises in a zone of border transport hubs develops at the expense of capacities of the enterprises which are a part of FAP. The research shows extent of necessary infrastructure development of FAP for the different enterprises on power, defines the enlarged infrastructure list of FAP and the list of the enterprises as a part of FAP. In the analysis of necessary infrastructure development of FAP the capacities demanding transition to the avtoport system are revealed. In article definition is given to the term “avtoport”. The infrastructure structure of the enterprises with a power up to 500 cars a day and FAP of 2000 and more cars in days is considered.

Key words: infrastructure development, complex entities of the frontier transport knot, avtoport.

REFERENCES

1. Vysotskaya T.A., Lubnev Yu.P. Rol' i mesto proizvodstvennoy infrastruktury v regional'nom razvitiy [Role and the place of production infrastructure in regional development]. Tekhnologii upravleniya [Technologies of management]. (Rostov-on-Don). 2001, No. 1. (in Russian)
2. Vysotskaya T.A. Puti razvitiya transportnoy sistemy kak vazhneyshey sostavlyayushchey proizvodstvennoy infrastruktury regiona [Ways of development of the transport system as the most important component of production infrastructure of the region]. Tekhnologii upravleniya [Technologies of management]. 2002. No. 2. (in Russian)
3. Vysotskaya T.A. Sovremennye aspekty razvitiya proizvodstvennoy infrastruktury regiona [Modern aspects of development of production infrastructure of the region]. Ekonomicheskie problemy Rossii i regiona: Uchenye zapiski [Economic problems of Russia and region: Scientific notes]. Rostov-on-Don, 2003. Vol. 8. (in Russian)
4. Menshikov S. Infrastrukture nuzhna tselostnost' [Infrastructure needs integrity]. Ekonomika i zhizn' [Economy and life]. 1995. No. 15. (in Russian)
5. Izard U. Metody regional'nogo analiza: vvedenie v nauku o regionakh [Methods of the regional analysis: introduction to science about regions]. Moscow, 1966. 660 p. (in Russian)
6. Anufrieva N.A. Regional'nye modeli infrastrukturnogo razvitiya kompleksnykh predpriyatiy na granitse RF [Regional models of infrastructure development of the complex enterprises on border of the Russian Federation]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 10–11. Pp. 80–92. (in Russian)
7. Anufrieva N.A. Osobennosti arkhitekturno-planirovochnoy organizatsii prigranichnykh avtomobil'nykh postov [Features of the architectural and planning organization of border automobile posts]. Arhitekton. 2014. No. 3. (in Russian)
8. Klesova S., Dranev Ya.N. et al. Praktika ekonomicheskogo razvitiya territorii: opyt ES i Rossii [Practice of economic development of the territory: experience of the EU and Russia]. Moscow, 2011. (in Russian)
9. Anufrieva N.A. Printsipy organizatsii arkhitekturnogo prostranstva transportnykh uzlov v prigranichnoy zone RF [The principles of the organization of architectural space of transport hubs in a border zone of the Russian Federation]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 12. Pp. 82–91. (in Russian)
10. Kiselev V.S., Zhirova O.D. Razvitie organizatsionno-kommercheskikh uslug za rubezhom [Development of organizational and commercial services abroad]. Moscow, 1989. (in Russian)
11. Kovalev N.R. Regional'naya proizvodstvennaya infrastruktura: planirovanie i intensivifikatsiya [Regional production infrastructure: planning and intensification]. Vladivostok, 1987. (in Russian)

УДК 721. 001

П.П. СЕМИКИН, Т.П. БАЦУНОВА

ДИНАМИЧЕСКАЯ АРХИТЕКТУРА. КИНЕТИЧЕСКИЕ ФАСАДЫ

Рассмотрена взаимосвязь динамической и кинетической архитектуры. Приведен ряд примеров современных зданий – родоначальников кинетической архитектуры. Выявлены основные особенности формирования данного типа объектов. Определены перспективные тренды динамической архитектуры.

Ключевые слова: архитектура, динамика, кинематика, городская среда, застройка, визуальное восприятие, образ.

Введение. Понятие «динамическая архитектура». Причина появления первых построек – желание человека защититься от воздействия внешних неблагоприятных факторов, упоминания о них относятся к эпохе позднего палеолита. В дальнейшем происходило усложнение объектов, появилось эстетическое осмысление – возникла архитектура. Практически с момента появления первых зданий архитекторами завладела идея создания изменяющегося объекта в ответ на преобразования, происходящие в окружающей среде. Подобные постройки стали возможны в последние десятилетия за счет применения ультрасовременных технических решений и строительных материалов, что определяет актуальность рассматриваемой тематики – «динамическая архитектура». В широком смысле динамическая архитектура связана с изменением формы, планировки, размеров здания, его движением и развитием, преобразованием конструкций фасада здания. Динамика в зодчестве может быть использована для усиления эстетических свойств сооружения, и что более важно, подобные здания устойчивы к воздействиям природных условий [1]. Основная особенность динамики – постоянное движение, кинетика же характеризуется наличием движущихся и статичных элементов. В случае со зданиями динамическая архитектура более обширное понятие, включающее в себя кинетическую. Но уровень современного научно-технического развития позволяет реализовывать только здания с фрагментарными, частичными движущимися фасадными элементами, которые являются примерами кинетической архитектуры.

Степень разработанности проблемы. Идеи динамической архитектуры лежат в основе многих концепций изменений объемно-пространственных и фасадных решений зданий. Разработкой этих вопросов занималось большое количество исследователей. Активная разработка данной тематики началась с 1950-х гг. в трудах отечественных и зарубежных авторов. Среди наиболее значимых исследователей можно отметить С.В. Волкова – изучение зданий с гибкими структурами, В. Машинского – принципы проектирования изменяющихся сооружений. С 1960-х гг. А.А. Гайдученя исследует принципы развития динамической архитектуры и издает монографию «Динамическая архитектура» [2]. В 1970-х гг. теме мобильного жилища посвящены

исследования Н.А. Сапрыкиной, которые в дальнейшем легли в основу ее диссертаций: кандидатской – «Особенности функционально-пространственной организации мобильного жилища экспедиционного типа», докторской – «Динамическая адаптация архитектурных объектов» [3].

Кроме того, необходимо отметить работы других авторов: Р. Арнхейма – организация динамических архитектурных форм; Н.Е. Барнабишвили – изучение особенностей работы динамических конструкций; О.М. Вартаняна – теоретические основы динамического структурного формообразования в архитектуре; О.В. Цайзера – архитектурно-пространственная организация трансформируемых спортивных сооружений; Ю.Б. Хромова – концепция динамического моделирования при комплексной планировочной организации рекреационных территорий; Е.Г. Лапшиной – архитектурное пространство как динамическая система.

Несмотря на разностороннюю направленность работ и существующие разработки, отсутствует комплексный анализ формирования динамической архитектуры с кинетическими фасадами.

Объект и предмет исследования. Рассматриваются здания, в которых корпуса, фасады и их части спроектированы таким образом, что под влиянием изначально предусмотренных факторов (природно-климатических, механических, временных) происходят фрагментарные изменения первичного положения или трансформация, или изменение свойств конструктивных частей объектов. Цель исследования: оценить взаимосвязь кинетической и динамической архитектуры современного периода. Задачи: определение возможностей формирования кинетической архитектуры; определение основных направлений перспективного развития динамической архитектуры.

Исторические предпосылки появления динамической архитектуры. Статичность объемно-пространственного решения отдельно взятого здания относительно динамически изменяемой городской среды стала предпосылкой развития «динамической архитектуры». Стремление зодчих к созданию подвижных объектов и динамически изменяемых фасадов послужило основой проектирования динамических зданий и сооружений.

В своих исследованиях А.А. Гайдучена приводит направления развития и формирования зданий динамической архитектуры (рис. 1):

1. *Мобильная архитектура*, которая представлена передвижными и перевозимыми зданиями.

2. *Трансформативная архитектура* – архитектура торговых и общественных зданий, трансформирующихся при помощи отдельных элементов (например, гибкая планировка).

3. *Эволюционно-адаптивная архитектура*. Изменения пространства могут происходить годами или десятилетиями. К данной группе относятся реконструируемые объекты; здания, в которых происходит достройка корпусов, блоков, этажей; изменение функционального наполнения с приспособлением объемно-планировочного решения [4].

4. *Архитектура тотального движения*. Здания этой группы содержат решения в области мобильности, трансформативности, адаптивности, автоматизации и кибернетики [2].

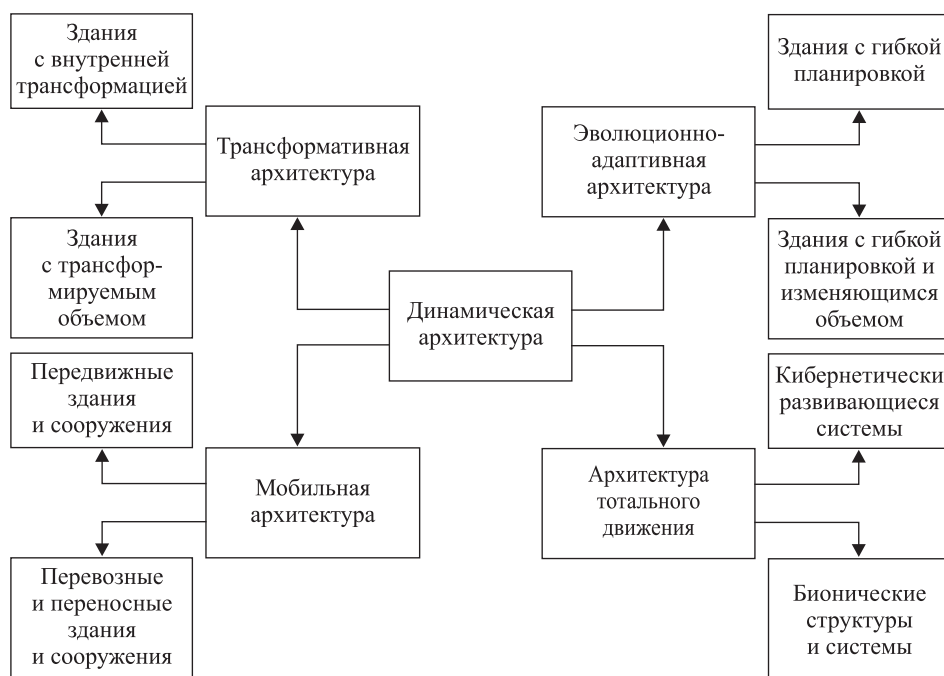


Рис. 1. Основные направления развития динамической архитектуры (согласно А.А. Гайдученя)

Следующую итерацию динамики в архитектуре стимулировало развитие электроники и появление экранов больших форматов, что привело к возникновению медиафасадов. Реализована идея изменения внешнего облика: днем здание воспринималось как один из рядовых элементов городской застройки, в ночное время оно становилось частью светового дизайна. Несмотря на различный внешний вид и его восприятие зрителем в темное и светлое время суток, создание медиаповерхностей это «визуально-динамическая» архитектура, потому что материальные границы здания и их пространственные координаты остаются неизменными.

Последующее направление – архитектура тотального движения – появилось в начале 1980-х гг. как прогноз, перспектива ближайшего будущего. Сегодня она реализуется на примерах зданий с кинетической архитектурой.

Примеры кинетических фасадных решений. Одним из первых результатов технологического прорыва стало открытие штаб-квартиры Инвестиционного совета Абу-Даби в ОАЭ. Данный объект содержит компонент кинетической архитектуры – подвижный фасад, реагирующий на погодные изменения [5]. Он состоит из элементов определенной формы, которые в темное и пасмурное время суток находятся в сложенном состоянии, а в ясный день раскрываются подобно зонтику, воспринимают энергию солнца и преобразовывают ее в электрическую [6]. Технологически – это решение из модулей, которые сформированы из гелиопанелей, металлического каркаса и системы датчиков, отслеживающих количество падающей солнечной энергии (рис. 2). Функционально – это заграждение-экран, защита от избыточного количества солнечного света и, как следствие, перегрева помещений внутри здания [7].



Рис. 2. Штаб-квартира Инвестиционного совета Абу-Даби

Другой пример – кинетическая постройка Сантьяго Калатравы Burke Brise soleil в Художественном музее Милуоки, по своему образу напоминающая птицу, крылья которой складываются в ненастную погоду и раскрываются в ясные дни (рис. 3, а) [8]. Помимо эстетической ценности, эта конструкция несет в себе функциональный аспект, регулируя инсоляционный и температурный режимы в помещении.

Здание с трансформирующимся фасадом Ocean pavilion было представлено в Корее на выставке EXPO 2012. Фасад данного павильона запроектиро-

а)



б)



Рис. 3. Общий вид зданий Burke Brise soleil (а)
и Ocean pavilion (б)

ван на основе аналогии с дыхательной системой китов и состоит более чем из сотни эластичных стеклопластиковых пластин, трансформирующихся под воздействием осадков и системы сервоприводов (рис. 3, б).

В КНР в 2016 г. в округе Шибей, в районе Чжанчан (Zhanchan Residential District) г. Циндао построено здание с кинетическим фасадом, издающим шелестящий звук. Это здание торгового центра «Magic Manufactory», спроектированное местным архитектором в 2012 г. По форме это небольшой объем длиной 15 м, один из его фасадов переливается различными цветами и создает эффект движения на поверхности. Технология его «изготовления» оказа-

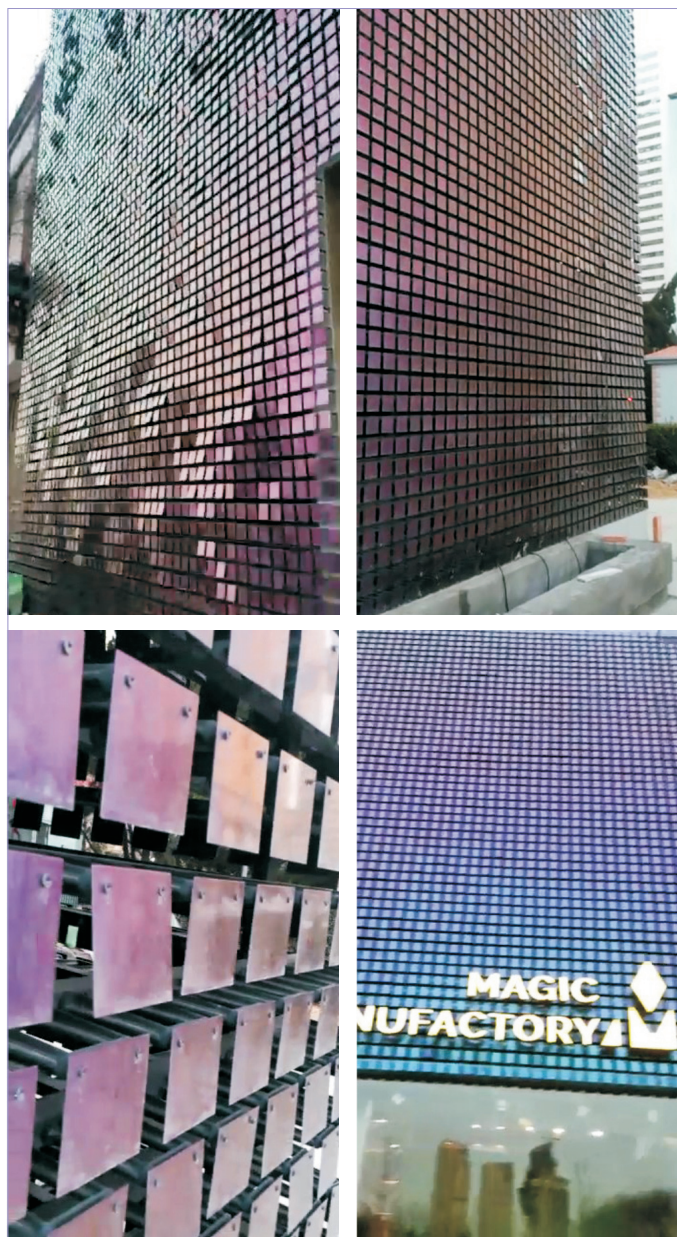


Рис. 4. Общий вид и детали торгового центра «Magic Manufactory»

лась проста и эффективна: основа как при устройстве обычного вентфасада, только вместо подсистемы, на которую навешиваются элементы внешней отделки, на несущую конструктивную основу монтируются выступающие металлические стержни, на концы которых крепятся небольшие кусочки из легкого металла, в данном случае покрашенные в разные цвета. Ветер свободно проходит через фасад и колеблет прикрепленные только к одной точке листы из легкого металла (рис. 4). При движении они создают эффект волн на фасаде со звуком шелеста.

В начале июня 2017 г. в центре Шанхая было открыто здание нового культурного центра, спроектированное «Foster + Partners and Heatherwick Studio», меняющее геометрию фасадов. Оно включает в себя выставочное пространство, арт-центр и театр. Вдохновленные традиционной китайской архитектурой театров архитекторы спроектировали трехэтажный объем с фасадом, который имитирует занавес из бронзовых труб (рис. 5). Эти трубы висят в три слоя, создавая полупрозрачные экраны перед окнами и балконами, волнообразно меняя свое положение. Когда дизайн был впервые анонсирован, архитекторы описали этот фасад как «движущуюся завесу, которая адаптируется к изменяющимся условиям использования здания и раскрывает сцену на балконе и видом на Пудун».



*Рис. 5. Здание нового культурного центра в Шанхае.
Общий вид*



Рис. 6. Фасад паркинга в аэропорту Брисбена «Вертикальное озеро». Общий вид

Один из недавних проектов с подобным решением – фасад паркинга в аэропорту Брисбена разработан австралийской студией «Urban Art Projects» и носит название «Вертикальное озеро» («Vertical Lake»).

Сформирован фасад из 250 000 алюминиевых элементов, зависящих от ветра. Назван «Вертикальным озером», потому что потоки воздуха способны менять угол наклона элементов, формируя постоянно меняющийся рельеф фасада, и это действительно похоже на озеро, где ветер поднял волны (рис. 6).

Оценка особенностей формирования кинетической архитектуры.

Анализ строительного, проектно-теоретического материалов объектов динамической архитектуры с кинетическими фасадами показал, что они имеют ряд преимуществ, которые позволяют:

- уменьшать избыточные теплопоступления (теплоэффективность и энергосбережение);
- вырабатывать энергию с использованием энергосберегающих технологий на основе возобновляемых источников энергии;
- изменять объемно-пространственные и планировочные решения за счет приемов световой выразительности и современных строительных материалов (таких как композиты, сталь, магний, титан, алюминий);
- сочетать инновационные технологии и конструктивные системы, способные увеличить потенциал использования сооружения и продлить срок службы;
- создавать постоянно изменяющиеся фасадные решения, которые преобразовывают пространство окружающей городской среды.

Эти возможности способствуют увеличению диапазона объемно-пространственных архитектурных решений, повышению энергоэффективности зданий и инвестиционной привлекательности территории путем включения кинетических элементов в фасады объектов.

Необходимо отметить, что тематика кинетической архитектуры требует более обширного анализа, который невозможен в рамках данной статьи.

Перспективы динамической архитектуры. Одним из концептов будущего является небоскреб Дэвида Фишера (автора теории динамической архитектуры), идею на который он запатентовал еще в 2004 г. Здание представляет собой 80-этажную сборную систему из стальных, алюминиевых конструкций, нанизанных на бетонный стержень. Каждый этаж вращается независимо

от других, а форма здания будет постоянно меняться (рис. 7, а). По словам автора идеи, жильцы могут видеть восход, а вечером из той же комнаты наблюдать закат. Оборот каждого этажа вокруг этой оси займет всего 6 дней. Благодаря вращению этажей здания вокруг своей оси, турбины, расположенные между этажами, ловят ветер, преобразуя его энергию в электричество [9].

Еще одним примером реальной динамики, но уже иного качества, является проект, созданный польскими учеными-архитекторами Дамьеном и Рафаэлем Пшибыла и получивший в архитектурном мире название «Кочующий небоскреб». В основе концепта лежит идея о свободе, независимости и возможности в любой момент в буквальном смысле «укатиться», куда пожелаешь, вместе со своим жилищем (рис. 7, б). Проект «кочующего небоскреба» представляет собой огромного диаметра колесо, внутри которого размещен жилой 3-этажный дом и зеленые насаждения. Колесо может перемещаться в пространстве вместе с расположенным в нем строением благодаря биотопливному двигателю.

Другое перспективное направление – сооружения транспортной инфраструктуры. Характерным примером является мост в Англии «Millennium bridge» (авторы – «ARUP Group Ltd.»), который поворачивается, пропуская

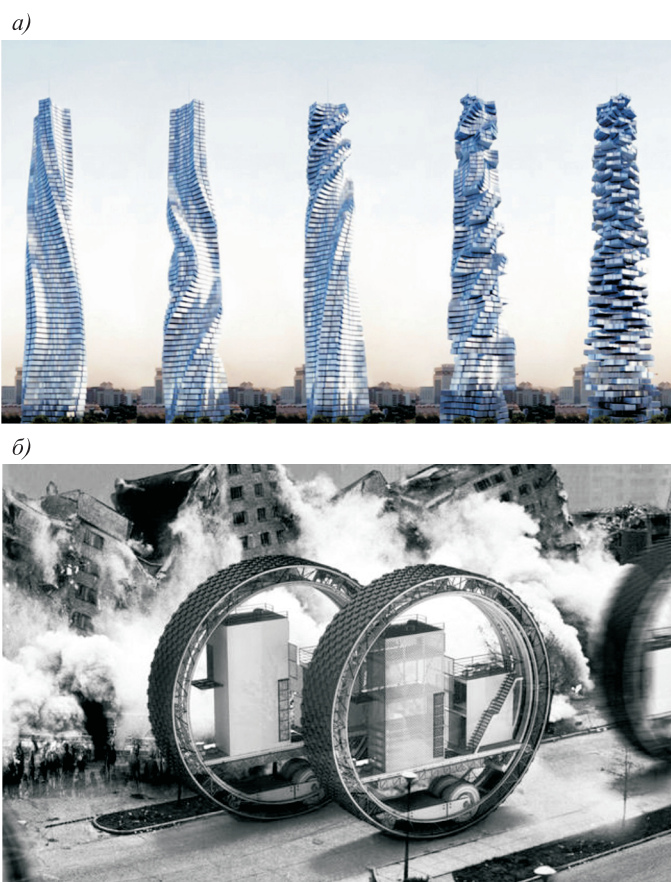


Рис. 7. Общий вид зданий динамического небоскреба Д. Фишера (а) и «Кочующего небоскреба» (б)

речной транспорт. Также в Англии есть еще один необычный пример «двигающегося» моста – это «Curling bridge» (дизайн – «Thomas Heatherwick Studio»). Этот пешеходный мост буквально скручивается вместе с ограждениями, создавая компактный объект благоустройства.

Направление динамической архитектуры с кинетическими фасадами сейчас находится в активной фазе развития. Ведется поиск и интеграция инновационных технологий и материалов, способных придать зданиям новые характеристики, увеличить срок эксплуатации при возможности гибкого изменения как внешнего облика, так и внутренних решений. Вероятно, в ближайшие десятилетия произойдет увеличение количества и разновидностей таких зданий, что потребует выявления особых типологических характеристик для данного вида объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бенаи Х.А., Балюба И.Г., Радионов Т.В. Динамическое совершенствование зданий и сооружений при реконструкции как основополагающий процесс преобразования архитектурной среды городов в условиях развития инновационных технологий // *Соврем. пром. и гражд. стр-во*. 2017. № 1. С. 37–45.
2. Гайдученя А.А. Динамическая архитектура: (Основные направления развития, принципы, методы). Киев: Будівельник, 1983. 94 с.
3. Сапрыкина Н.А. Особенности формирования среды обитания в контексте динамической адаптации архитектурного пространства // *Приволж. науч. вестн.* 2015. № 1. С. 93–97.
4. Бенаи Х.А., Пермьяков М.Б., Чернышова Э.П., Радионов Т.В. Формирование динамической структуры архитектурных объектов при комплексной реконструкции // *Архитектура. Строительство. Образование*. 2016. № 2. С. 20–26.
5. Семикин П.П., Бацунова Т.П. Особенности объемно-пространственных решений высотных зданий с возобновляемыми источниками энергии // *Изв. вузов. Строительство*. 2015. № 1. С. 69–76.
6. Семикин П.П. Особенности архитектурных решений высотных зданий при использовании энергии ветра и солнца // *Региональные архитектурно-художественные школы*. 2014. № 1. С. 80–86.
7. Сапрыкина Н.А. Солнечный свет как организующий фактор формирования динамической архитектуры // *Светотехника*. 2016. № 6. С. 48–54.
8. Титова Е.А., Коробий Е.Б. Кинетика в архитектуре – движение в пространстве и во времени // *Новые идеи нового века: Материалы междунар. науч. конф. ФАД ТОГУ*. 2012. Т. 2. С. 121–125.
9. Сырги А.В. Кинетическая архитектура – архитектура движения // *Электронный сборник статей по материалам XII студ. междунар. науч.-практ. конф. «Научное сообщество студентов. Междисциплинарные исследования»*. 2017. С. 24–29.

Семикин Павел Павлович, канд. архитектуры, ведущий архитектор;

E-mail: ingil_arch@mail.ru

ООО «Мезонпроект», г. Москва

Бацунова Татьяна Павловна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: litodano@mail.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 10.05.18

Semikin Pavel Pavlovich, PhD, Lead Architect; E-mail: ingil_arch@mail.ru

Mezonproject Ltd., Moscow, Russia

Batsunova Tat'yana Pavlovna, PhD, Ass. Professor; E-mail: litodano@mail.ru

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

DYNAMIC ARCHITECTURE. KINETIC FACADES

The article considers the relationship between dynamic and kinetic architecture. A number of examples of modern buildings – the founders of kinetic architecture. The main features of the formation of this type of objects are revealed. Identify long-term trends of dynamic architecture.

Key words: architecture, dynamics, kinematics, urban environment, development, visual perception, image.

REFERENCES

1. Benai Kh.A., Balyuba I.G., Radionov T.V. Dinamicheskoe sovershenstvovanie zdaniy i sooruzheniy pri rekonstruktsii kak osnovopolagayushchiy protsess preobrazovaniya arkhitekturnoy sredy gorodov v usloviyakh razvitiya innovatsionnykh tekhnologiy [Dynamic improvement of buildings and constructions under reconstruction as a fundamental process of transformation of the architectural environment of cities in the development of innovative technologies]. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Modern industrial and civil construction]. 2017. No. 1. Pp. 37–45. (in Russian)
2. Gayduchenya A.A. Dinamicheskaya arkhitektura: (Osnovnye napravleniya razvitiya, printsipy, metody) [Dynamic architecture: (Main directions of development, principles, methods)]. Kiev, Budivel'nik, 1983. 94 p. (in Russian)
3. Saprykina N.A. Osobennosti formirovaniya sredy obitaniya v kontekste dinamicheskoy adaptatsii arkhitekturnogo prostranstva [The peculiarities of the environment in the context of dynamic adaptation of the architectonic space]. *Privolzhskiy nauchnyy vestnik* [Volga scientific Bulletin]. 2015. No. 1. Pp. 93–97. (in Russian)
4. Benai Kh.A., Permyakov M.B., Chernyshova E.P., Radionov T.B. Formirovanie dinamicheskoy struktury arkhitekturnykh ob'ektov pri kompleksnoy rekonstruktsii [The formation of dynamic structure of architectural objects during complex reconstruction]. *Arkhitectura. Stroitel'stvo. Obrazovanie* [Architecture. Construction. Education]. 2016. No. 2. Pp. 20–26. (in Russian)
5. Semikin P.P., Batsunova T.P. Osobennosti ob'emno-prostranstvennykh resheniy vysoznykh zdaniy s vozobnovlyаемymi istochnikami energii [Features of volumetric-spatial solutions of high-rise buildings with renewable energy sources]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No. 1. Pp. 69–76. (in Russian)
6. Semikin P.P. Osobennosti arkhitekturnykh resheniy vysoznykh zdaniy pri ispol'zovanii energii vetra i solntsa [Features architectural solution high-rise buildings by using the energy of wind and sun]. *Regional'nye arkhitekturno-khudzhestvennye shkoly* [Regional architecture and art schools]. 2014. No. 1. Pp. 80–86. (in Russian)
7. Saprykina N.A. Solnechnyy svet kak organizuyushchiy factor formirovaniya dinamicheskoy arkhitckтуры [Sunlight as an organizing factor in the formation of dynamic architecture]. *Svetotekhnika* [Light engineering]. 2016. No. 6. Pp. 48–54. (in Russian)

8. Titova E.A., Korobiy E.B. Kinetika v arkhitekture – dvizhenie v prostranstve i vo vremeni [Kinetics in architecture – the movement in space and in time]. Novye idei novogo veka: Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii FAD TOGU [New ideas of new century: proceedings of the international conference FAD PNU]. 2012. Vol. 2. Pp. 121–125. (in Russian)
 9. Syrgi A.V. Kineticheskaya arkhitektura – arkhitektura dvizheniya [Kinetic architecture is the architecture of movement]. Elektronnyy sbornik statey po materialam XII stydencheskoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauchnoe soobshchestvo studentov. Mezhdistsiplinarnye issledovaniya» [Electronic proceedings of the XII international student scientific-practical conference «Scientific community of students. Interdisciplinary research»]. 2017. Pp. 24–29. (in Russian)
-

УДК 721:72.025.4

О.С. СУББОТИН, С.А. БОНДАРЕНКО

**РОЛЬ МАТЕРИАЛА В РЕСТАВРАЦИИ ПАМЯТНИКОВ
АРХИТЕКТУРНОГО НАСЛЕДИЯ**

Отмечено, что в настоящее время большинству памятников архитектурного наследия, оказавшихся под угрозой разрушения, необходимы комплексные и неотложные меры по реставрации и капитальному ремонту. Особое место в исследовании занимают требования, предъявляемые к материалам, применяемым при реконструкции здания, и к его подлинности. Акцент делается на правовые отношения в области градостроительного законодательства в сфере сохранения архитектурного наследия. В качестве примера проведен ретроспективный анализ исторической части г. Краснодара. Обозначены архитектурно-планировочные характеристики композиционного ядра центра города. Значительное внимание уделено памятникам регионального значения: «Дом генерала И.К. Назарова», «Дом жилой архитектора А.П. Косякина» и памятнику федерального значения «Дом купца Никитина». Проанализированы реконструктивные мероприятия, выполненные на отреставрированных зданиях.

Ключевые слова: архитектура, исторический центр, застройка, памятник, Краснодар, наследие, сохранение, материал, городская среда.

Высочайший потенциал архитектурно-градостроительного наследия – духовное и культурное богатство невозместимой ценности. Глубокие эстетические качества, степень сохранности указанного наследия, являющегося хранителем исторической памяти, обеспечивают особую инвестиционную привлекательность любого населенного места [1]. В памятниках материализовано состояние духовной культуры народа-созидателя и овеществлен его труд, что позволяет дать в дополнение к культурно-исторической одновременно и экономическую оценку [2]. Особенно важно при этом обращение к архивным материалам, которые позволят более точно установить время и обстоятельства строительства [3].

Актуальность проблемы исследования. Изучение архитектурного наследия ведет к переосмысливанию основополагающей его роли как для настоящего, так и будущего поколений. Наряду с этим, возникает также проблема недостаточности научно-методологического исследования концепции сохранения и восстановления памятников.

Обзор состояния проблемы и степень ее разработанности. Теоретические и методологические материалы по сохранению архитектурного наследия представлены в многочисленных трудах ученых. Их работы широко известны общественности, остро осознающей проблемность ситуации, связанной с современным состоянием памятников архитектуры. В то же время тема исследования, посвященная роли материала в реставрации памятников архитектурного наследия, является актуальной, так как правильный выбор при надлежащем выполнении данного мероприятия обеспечивает набор особых

характерных, специфических показателей, отличающих данное изделие от других, и соответствие оригиналу первоначального материала.

Объект исследования – памятники архитектурного наследия, система архитектурных форм и деталей отдельных объектов.

Предмет исследования – материал, применяемый в реставрации архитектурного наследия.

Цель исследования – выявление особенностей строительных материалов, используемых при реставрации памятников архитектурного наследия.

В соответствии с поставленной целью определены задачи исследования, которые заключаются в том, чтобы изучить современное состояние памятников архитектуры, определить стратегию их сохранения и обновления.

Реставрация и сохранение памятников архитектурного наследия, являющихся исторической и духовной памятью человечества, – основная задача не только для настоящего поколения, но и для будущего. При выборе материала для реставрации и последующего сохранения объектов важное значение имеет вопрос в какой степени он подходит к выполнению указанных мероприятий, как будет реагировать в атмосфере открытого пространства при выполнении фасадных работ и на реакцию других внешних факторов. Одновременно отделка фасада памятника архитектуры кроме декоративной функции выполняет еще и защитную по отношению к памятнику. При этом отделочные составы

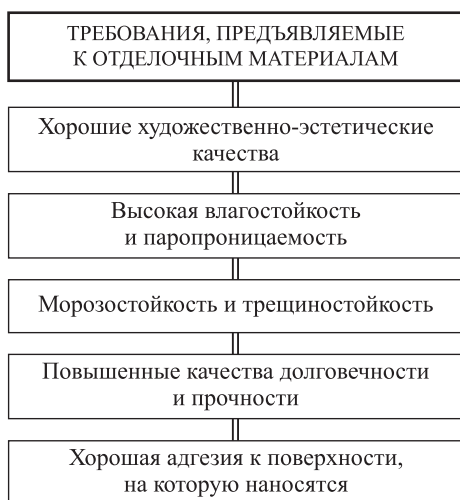


Рис. 1. Требования, предъявляемые к отделочным материалам

должны также отвечать многочисленным требованиям (рис. 1). Одним из критериев в определении историко-архитектурной ценности указанных зданий является то обстоятельство, насколько они сохранили свою историческую значимость и подлинность на момент исследования. При рассмотрении подлинности (аутентичности) здания следует брать в расчет ряд факторов (рис. 2).

Современные методы придания декоративных свойств каменным стенам включают: использование разнообразных красок, обладающих самой широкой гаммой свойств; выполнение фасадного ряда кладки из лицевого кирпича или керамических камней с тщательной расшивкой швов на фа-

саде; декоративную наружную высококачественную штукатурку; облицовку плитами естественного камня [4]. Следует отметить, что в настоящее время широкая палитра строительных материалов позволяет успешно выполнять реставрацию, капитальный ремонт и восстановление памятников архитектурно-градостроительного наследия на высоком уровне.

Выбору материалов должен предшествовать предварительный этап материаловедческого исследования объекта реставрации, с непременно детальным изучением состава материала и применяемых технологий при проведении указанного процесса, единовременности или разновременности воз-

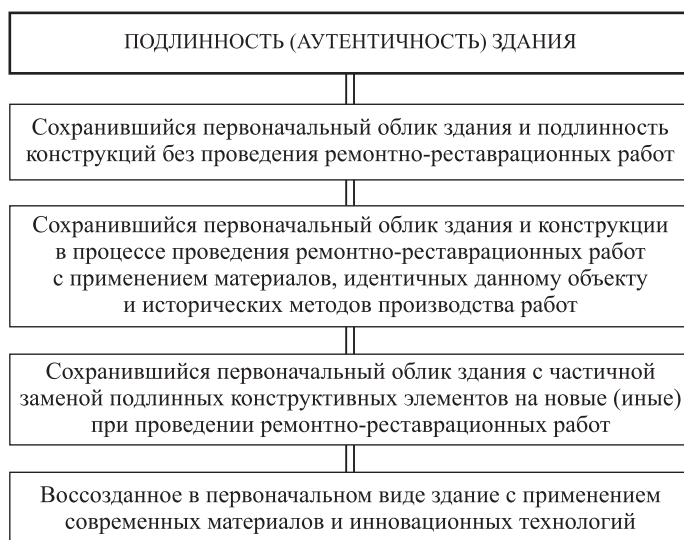


Рис. 2. Подлинность (аутентичность) здания

ведения разного рода фрагментов и частей памятников архитектурного наследия, объективной возможности целенаправленного воздействия на частично разрушенные или изменившиеся материалы, из которых указанные объекты созданы. Строительные материалы в реставрации памятников архитектурного наследия играют важную роль. От структуры (внутреннее строение, а именно расположение в пространстве частиц разнообразного размера, имеющих между собой устойчивые связи и порядок сцепления) и физических свойств (плотность, тепловые, электрические, магнитные и тому подобные свойства) строительного материала зависит конечный итог указанных реставрационных работ, его конструктивное решение или же архитектурно-художественный и эстетический вид.

Вместе с тем беспокойство вызывает тот факт, что «новое строительство, не подкрепленное градостроительными обоснованиями, далеко не всегда обеспечено необходимой инфраструктурой, не всегда органично вписывается в историко-архитектурный контекст, разрушая сложившуюся исторически ценную городскую среду, формирующиеся градостроительные ансамбли» [5]. Реконструкция исторического центра не должна нарушать масштаба и архитектурного облика исторической среды [6].

Интенсивная урбанизация исторических центров многих городов ставит под угрозу существование многих исторических зданий. Следует правильно оценить сложность процесса реставрации, его особую специфику, а также применение соответствующих материалов при выполнении указанного процесса. В качестве примера можно привести оценку реставрационных работ на памятниках архитектуры в г. Краснодаре.

Примечательно, что уже «в начале XX в. темпы гражданского строительства в Екатеринодаре (Краснодаре. – О.С., С.Б.) с каждым годом заметно возрастали. Если в 1909 г. городской управой было рассмотрено и утверждено 130 проектов, то в 1910-м количество их увеличилось до 210»¹. В эти годы

¹ Кубанский курьер. 1910. № 494. 19 мая.

на Кубани успешно работали такие крупные знатоки своего дела, как гражданские инженеры широкого профиля И.К. Мальгерб, З.П. Коршевец, Н.Г. Петин, А.П. Косякин, И.В. Рымаревич-Альтманский, В.С. Турищев, Н.А. Милованов, Н.М. Козо-Полянский. Все эти архитекторы или уроженцы, или давние жители степного края блестяще зарекомендовали себя возведенными постройками, которые поистине украсили казачий город и поныне являются архитектурными памятниками [7].

Композиционное ядро Краснодара – общегородской центр линейного типа, расположенный в исторической части вдоль ул. Красной с сохранившимися элементами планировочной структуры. Одной из его особенностей является наличие на его территории значительного количества объектов архитектурного наследия. Исторически сложившаяся застройка доминирующая по отношению к современным зданиям. Необходимо особо выделить, что «целостность и гармоничность исторически сложившейся застройки может быть обеспечена и поддержана профессиональной разработкой планировочно-пространственных моделей отдельных элементов планировочной структуры: квартал, микрорайон, транспортно-общественный комплекс, улица или ее отдельный фрагмент и т.д.» [8].

Как наглядную иллюстрацию качественной реставрации памятника архитектурного наследия следует охарактеризовать восстановление исторического облика «Дома генерала И.К. Назарова» по ул. Красная, 19 / Комсомольская, 47 в г. Краснодаре (Екатеринодаре), построенного в 1886–1887 гг. Большинство исследователей предполагают, что проект особняка был разработан В.А. Филипповым. Двухэтажное здание, фасады которого выполнены в псевдорусском стиле из красного кирпича, оформляет северо-западный угол перекрестка исторической части города (рис. 3, 4).

При выполнении реставрации швы кладки наружных стен предварительно были расчищены и расшиты безусадочным раствором с добавлением инновационных гидрофобизирующих добавок. Среди них «Аквасол» – гидрофобизирующая пропитка для камня и бетона, «силиконовый состав SILRES BS 16, который создает защитный слой на поверхности керамического кирпича и черепицы» [9] и др. В то же время некачественно проведенные реставрационные



Рис. 3. Дом генерала И.К. Назарова, 1929 г. Фото Р.М. Гличева



Рис. 4. Дом генерала И.К. Назарова, XXI в. Фото авторов

работы могут нанести невосполнимый ущерб. Так, специалисты управления государственной охраны объектов культурного наследия Краснодарского края в марте 2018 г. обнаружили вздутие штукатурного слоя цоколя во время реставрации памятника архитектуры федерального значения старинного особняка «Дома купца Никитина, конец XIX в.» по ул. Красная, 18.

Необходимо было оштукатурить панели, расположенные на нижней части цоколя, что представляет собой довольно сложный процесс. Но для реставрации углов и боковых скосов панелей был применен гипсокартон, приклеенный к основанию кирпичной кладки цоколя, который выполнен из забутовочного кирпича. Впоследствии причиной разрушения отделочного слоя стало применение не кондиционного для финишной отделки материала, а также выполнение работ в осенне-зимний период при перепаде температур днем и ночью, что не позволило полностью выдержать технологический процесс. В дальнейшем подрядной организации пришлось исправлять выявленные недостатки (рис. 5). Из этого следует, что материалы должны подбираться неукоснительно под те условия, в которых будут эксплуатироваться.



Рис. 5. Дом купца Никитина, XXI в. Фото авторов



Рис. 6. Дом архитектора А.П. Косякина, XXI в.
Фото авторов

Все большую тревогу вызывает судьба многих памятников архитектуры и градостроительства г. Краснодара. Так, в центральной части города, в исторической среде, на территории, которая является началом становления и формирования будущей казачьей столицы Кубани – Екатеринодаре, в печальном ожидании проведения ремонтно-реставрационных работ стоит памятник архитектуры «Дом жилой архитектора А.П. Косякина», расположенный по адресу ул. им. Н.И. Кондратенко (бывшая Короткая), 13 (рис. 6).

Рассматривая данный памятник архитектуры, следует обратить внимание на страницы жизни – зодчего, которому принадлежал объект. Перед юным Косякиным открывалась военная карьера. Но он после окончания 7-го дополнительного класса Ставропольской гимназии (реального отделения), испытывая неудержимую тягу к строительству, поступил в Петербурге в институт гражданских инженеров. Окончив его, молодой строитель работал два года инженером в Подольском губернском правлении. Затем А.П. Косякин переводится на Кубань. И спустя еще два года назначается на большую ответственную должность областного архитектора [10].

Сохранив и восстановив памятник архитектуры «Дом жилой архитектора А.П. Косякина», мы тем самым почтим память замечательного человека, выдающего зодчего, построившего большое количество зданий в Екатеринодаре и кубанских станицах. Для реставрации и капитального ремонта рассматриваемого памятника архитектуры предлагается использование материалов фирмы КНАУФ, а именно универсальной гипсовой КНАУФ-Ротбанд, гипсовой шпаклевки КНАУФ Мульти-Финиш [11].

Грамотно выполненные реставрационные работы с применением инновационных материалов позволяют на долгие годы сохранить памятники архитектурного наследия. При этом ставится определенная цель – максимально полное раскрытие особенностей объекта, выявление его историко-культурной ценности и в первую очередь долговременная эксплуатация без дополнительных ремонтов. Фактически «красота здания состоит не только в гармо-

ничности его пропорций и форм, но и в ощущении равновесия, основанного на расположении всех элементов» [12].

Основное условие сохранения историко-культурного наследия – консолидация усилий государственных и муниципальных органов власти и государственных органов охраны памятников, общественных организаций. Необходимо совершенствование системы взаимодействия государственных органов охраны памятников истории и культуры и органов архитектуры и градостроительства всех уровней. Важно, чтобы при подготовке нормативно-правовых актов Государственного земельного кадастра Российской Федерации строго учитывались земли историко-культурного назначения [13].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Субботин О.С. Инновационные материалы в памятниках архитектурно-градостроительного наследия Кубани // Жилищное строительство. 2015. № 11. С. 35–40.
2. Субботин О.С. Памятники архитектурного наследия Тобольска // Жилищное строительство. 2011. № 10. С. 48–50.
3. Памятники русской архитектуры и монументального зодчества. Стиль, атрибуции, датировка. М.: Наука, 1983. 280 с.
4. Черняк В.З. Уроки старых мастеров. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1989. 238 с.
5. Туманик Г.Н., Колпакова М.Н. Актуальные задачи архитектурно-пространственного развития исторической зоны центра Новосибирска // Градостроительство. 2012. № 3. С. 61–65.
6. Субботин О.С. Методология исследования архитектурно-градостроительного развития Кубани // Жилищное строительство. 2014. № 8. С. 29–34.
7. Бардадым В.П. Архитектура Екатеринодара. Краснодар: Сов. Кубань, 2002. 256 с.
8. Туманик Г.Н. Регулирование этажности застройки и проблемы нормативно-правовой базы реконструкции ценной городской среды // Вестн. Том. гос. архитектурно-строит. ун-та. 2017. № 5. С. 58–66.
9. Плитарак Ю.В. Защита облицовочного кирпича от влаги и высолов // Строит. материалы. 2009. № 4. С. 65.
10. Бардадым В.П. Зодчие Екатеринодара. Краснодар: Сов. Кубань, 1995. 112 с.
11. Субботин О.С., Бондаренко С.А. Инновации в архитектуре и строительстве (на примере Краснодарского края). М.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2016. 80 с.
12. Буссальи Марко. Понимать архитектуру; пер. с итал. М.: ЗАО «БММ», 2007. 84 с.
13. Субботин О.С. Важнейшие этапы освоения Кубани и стратегия ее развития // Вестн. МГСУ. 2011. № 2-2. С. 14–18.

Субботин Олег Степанович, д-р архитектуры, проф.

Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, г. Краснодар

Бондаренко Сергей Алексеевич, канд. техн. наук, директор

Филиал ООО «КНАУФ ГИПС», г. Краснодар

Получено после доработки 03.05.18

Subbotin Oleg Stepanovich, DSc, Professor

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia

Bondarenko Sergey Alekseevich, PhD, Director

Southern Sales KNAUF GIPS LLC, Krasnodar, Russia

THE ROLE OF MATERIAL IN THE RESTORATION OF ARCHITECTURAL HERITAGE

It is noted that at present most of the monuments of architectural heritage, which are under threat of destruction, require complex and urgent measures for restoration and major repairs. A special place in the study is occupied by the requirements for materials used in the reconstruction of the building and its authenticity. The emphasis is on legal relations in the field of town planning legislation in the field of preservation of architectural heritage. As an example, a retrospective analysis of the historical part of the city of Krasnodar was made. Architectural and planning characteristics of the composite core of the city center are indicated. Considerable attention is paid to monuments of regional importance: “The house of general I.K. Nazarov”, “The house of the residential architect A.P. Kosyakin” and a monument of federal significance “The house of merchant Nikitin”. Reconstructive measures performed on the restored buildings are analyzed.

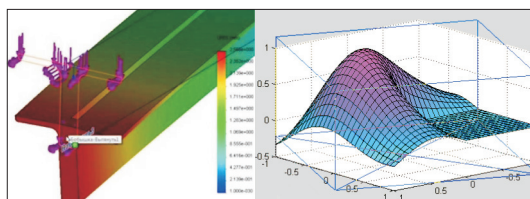
Key words: architecture, historical center, buildings, monument, Krasnodar, heritage, preservation, material, urban environment.

REFERENCES

1. Subbotin O.S. Innovatsionnye materialy v pamyatnikakh arkhitekturno-gradostroitel'nogo naslediya Kubani [Innovative materials in the monuments of architectural and town-planning heritage of the Kuban]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing construction]. 2015. No. 11. Pp. 35–40. (in Russian)
2. Subbotin O.S. Pamyatniki arkhitekturnogo naslediya Tobol'ska [Monuments of the architectural heritage of Tobolsk]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing construction]. 2011. No. 10. Pp. 48–50. (in Russian)
3. Pamyatniki russkoy arkhitektury i monumental'nogo zodchestva. Stil'; atributsii, datirovka [Monuments of Russian architecture and monumental architecture. Style, attribution, dating]. Moscow, Nauka, 1983. 280 p. (in Russian)
4. Chernyak V.Z. Uroki starykh masterov [Lessons from the old masters]. Moscow, Stroyizdat, 1989. 238 p. (in Russian)
5. Tumanik G.N., Kolkpakova M.N. Aktual'nye zadachi arkhitekturno-prostranstvennogo razvitiya istoricheskoy zony tsentra Novosibirska [Actual problems of the architectural and spatial development of the historical zone of the center of Novosibirsk]. *Gradostroitel'stvo* [Urban Development]. 2012. No. 3. Pp. 61–65. (in Russian)
6. Subbotin O.S. Metodologiya issledovaniya arkhitekturno-gradostroitel'nogo razvitiya Kubani [Methodology research of architectural and town-planning development of the Kuban]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing construction]. 2014. No. 8. Pp. 29–34. (in Russian)
7. Bardadyan V.P. Arkhitektura Ekaterinodara [Architecture of Ekaterinodar]. Krasnodar, 2002. 256 p. (in Russian)
8. Tumanik G.N. Regulirovanie etazhnosti zastroyki i problemy normativno-pravovoy bazy rekonstruktsii tsennoy gorodskoy sredy [Regulation of the number of storeys and the problem of the regulatory and legal framework for the reconstruction of a valuable urban environment]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [Vestnik of the Tomsk State Architectural and Construction University]. 2017. No. 5. Pp. 58–66. (in Russian)

9. Plitarak Yu.V. Zashchita oblitsovochnogo kirpicha ot vlagi i vysolov [Protecting facing brick from moisture and efflorescence]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2009. No. 4. P. 65. (in Russian)
 10. Bardadym V.P. Zodchie Ekaterinodara [Architects of Ekaterinodar]. Krasnodar, 1995. 112 p. (in Russian)
 11. Subbotin O.S., Bondarenko S.A. Innovatsii v arkhitekture i stroitel'stve (na primere Krasnodarskogo kraia) [Innovations in architecture and construction (the example of the Krasnodar territory)]. Moscow, 2016. 80 p. (in Russian)
 12. Bussali Marco. Ponimat' arkhitekturu [Understand architecture]. Moscow, 2007. 84 p. (in Russian)
 13. Subbotin O.S. Vazhneyshie etapy osvoeniya Kubani i strategiya ee razvitiya [The most important stages in the development of the Kuban and the strategy for its development]. Vestnik MGSU [Vestnik MSUCE]. 2011. No. 2-2. Pp. 14–18. (in Russian)
-

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



УДК 624.075.2.014.2

Д.В. КОНИН, А.Р. ОЛУРОМБИ

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ПРЯМОШОВНЫХ И СПИРАЛЬНОШОВНЫХ ТРУБ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ЦЕНТРАЛЬНОМ И ВНЕЦЕНТРЕННОМ СЖАТИИ НА ПРИМЕРЕ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Представлены исследования устойчивости электросварных прямошовных и спиральношовных труб при центральном и внецентренном сжатии с целью выявления критериев потери местной устойчивости, влияния электросварного шва на устойчивость, сравнения результатов эксперимента с численным и нормативным расчетом. Выполнены испытания полномасштабных образцов труб на тысячетонном прессе. Уделено внимание изучению инженерных свойств трубных сталей и электросварных соединений. Приведены результаты исследования на прочность, ударную вязкость основного металла и зоны сплавления, микро- и макроструктуры стали. По результатам работы выявлены недостатки нормативного и конечно-элементного расчета. Определены характеристики, влияющие на расхождение полученных результатов. Сделаны выводы о необходимости внесения дополнений в действующий свод правил по стальным конструкциям, связанных с расчетом на устойчивость трубчатых элементов.

Ключевые слова: трубы электросварные, устойчивость, эксцентриситет, гибкость, численный расчет, испытания.

Введение. Изготовление строительных конструкций из высокопрочных труб на территории России является решением нетиповым [1] и находит место преимущественно в уникальных сооружениях. Проектирование подобных сооружений в должной мере не регламентируется действующими строительными нормами. Как правило, в таких случаях разрабатываются специальные технические условия, в которых устанавливаются необходимые коэффициенты запаса. Однако эти коэффициенты зачастую не имеют экспериментального подтверждения. Использование неверных коэффициентов ведет к потере основных преимуществ высокопрочного трубного проката – экономичности и эффективности.

Совершенствование норм и разработка новых методик расчета элементов из сталей нового поколения является неотъемлемым шагом в развитии металлических конструкций [2, 3]. Для детального и достоверного изучения физико-механических свойств элементов из стали необходимы натурные ис-

© Конин Д.В., Олуромби А.Р., 2018

пытания, результаты которых могут служить основой для выявления новых закономерностей и создания расчетных формул [4]. Данная статья посвящена изучению вопроса устойчивости прямошовных и спиральношовных труб среднего и большого диаметра из сталей повышенной и высокой прочности на примере натурных экспериментов.

Задачи и методики исследования. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко были проведены исследования устойчивости при центральном и внецентренном сжатии прямошовных и спиральношовных труб. Цель работы заключалась в определении критических нагрузок и сравнении результатов эксперимента с нормативным и численным расчетом. Полученные результаты будут основой для разработки новой или уточнения существующей нормативной методики расчета [5].

Объектом исследования стали 23 трубы (рис. 1): 10 спиральношовных, производства Волжского трубного завода и 13 прямошовных, производства Выксунского металлургического завода (табл. 1).

Испытания проводились с использованием пресса MAN1000, который способен обеспечить нагрузку до 1000 т, максимальная рабочая высота образца – 4 м [6]. По торцам труб приваривались стальные пластины толщиной 36 мм, а также вертикальные ребра жесткости из листа толщиной 20 мм для равномерного распределения нагрузки от пресса (рис. 2). На рис. 3 изображены схемы моделей для центрального и внецентренного сжатия, установленные на прессе. Электросварной шов в прямошовных трубах располагался диаметрально противоположно эксцентриситету для восприятия наименьших сжимающих напряжений.

Для проведения испытаний на центральное сжатие [7] образцы устанавливались между верхним и нижним столами пресса так, чтобы центральная ось трубы совпадала с центральной осью пресса (см. рис. 3, а). Столы пресса представляют собой шарнирно неподвижные опоры. Для испытаний на внецентренное сжатие на верхний и нижний столы пресса дополнительно устанавливались специальные ножи, позволяющие сделать



Рис. 1. Общий вид испытательных образцов труб

Таблица 1. Типоразмеры испытательных образцов труб

Сечение, мм	Эксцентриситет, мм	Длина образца, м	Тип электросварки
325×9	120	3,3	Прямошовная
325×9	120	2	– » –
325×9	120	2	– » –
325×9	120	3,3	– » –
325×9	70	3,3	– » –
325×9	0	3,3	– » –
325×5	120	3,3	– » –
325×5	120	3,3	– » –
325×5	70	3,3	– » –
325×5	0	3,3	– » –
530×8	150	3,3	– » –
530×8	210	3,3	– » –
530×8	0	3,3	– » –
630×8	0	3,3	Спиральношовная
630×8	180	3,3	– » –
530×10	0	3,3	– » –
530×10	120	3,3	– » –
530×10	180	3,3	– » –
530×10	0	3,3	– » –
530×10	120	3,3	– » –
530×10	180	3,3	– » –
720×7,5	0	3,3	– » –
720×7,5	225	3,3	– » –

принималось состояние лавинообразного увеличения деформаций и падение давления на манометре пресса при попытке увеличения сжимающей нагрузки.

Материалы труб. Для выполнения основных задач исследования была проведена оценка комплекса инженерных свойств сталей труб. Рассматривались свойства основного металла трубы путем стандартных испытаний на растяжение, ударный изгиб, оценивался химический состав и микроструктура. Протяженность сварного шва в сечении трубы составляет менее 3 % от протяженности периметра, однако при определенных условиях эта локальная зона может повлиять на несущую способность всей трубы. Исследовались свойства металла сварного соединения путем замеров твердости, в первую очередь относительно основного металла. Выполнялись испытания на ударный изгиб, также оценивалась микроструктура соединения.

шарнир в одной продольной плоскости и точно определить значение эксцентриситета (см. рис. 3, б).

В процессе эксперимента нагрузка на образцы подавалась медленно, исключая значительные динамические воздействия, и с перерывами для снятия показаний приборов. Таким образом, нагрузка прикладывалась ступенями в количестве от 5 до 10. В качестве фиксирующих приборов применялись тензометрические датчики, прогибомеры, датчик давления и манометр пресса. На каждую трубу устанавливалось 14 тензодатчиков, в двух точках крепились прогибомеры (рис. 4).

Для оценки влияния электросварного шва в непосредственной близости (1–2 см) устанавливалось несколько тензодатчиков. С их помощью фиксировалось неравномерное распределение напряжений. Один прогибомер закреплялся на нижнем столе пресса для контроля вертикальных перемещений. Показания тензодатчиков записывались на персональный компьютер с частотой дискретизации 30 Гц. Данные, полученные с измерительных приборов, далее сравнивались с численными и аналитическими расчетами. В качестве критерия потери устойчивости

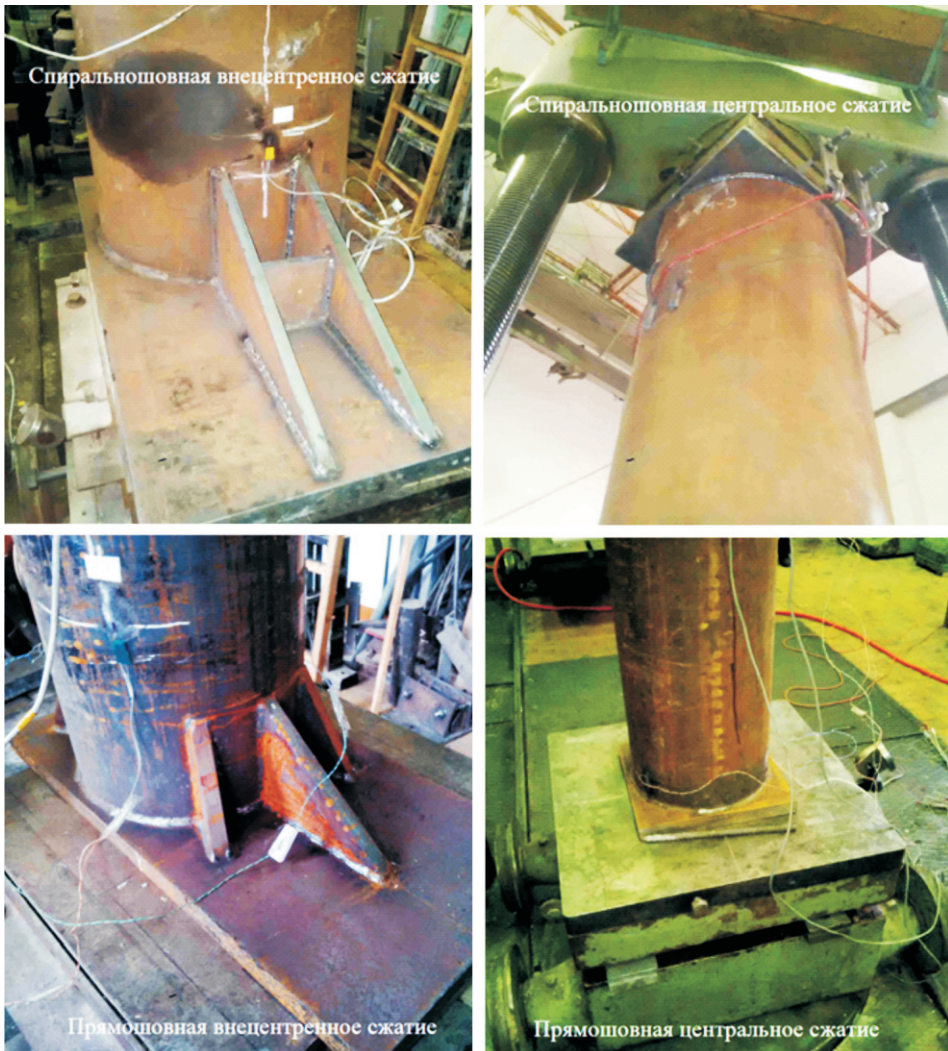


Рис. 2. Вид опорных пластин и ребер

Испытания на прочность проводились на цилиндрических продольных пятикратных образцах диаметром 5 мм в соответствии с ГОСТ 1497.

Микроструктура стали изучалась методом оптической металлографии на продольных микрошлифах, протравленных в 4%-м спиртовом растворе азотной кислоты. В металле труб имела место высокодисперсная микроструктура, обычно классифицируемая как бейнито-ферритная полосчатая. Фактически это высокодисперсная структура с выявленными при данной методике структурными элементами порядка $\approx 3,0\text{--}5,0$ мкм, по границе которой в ряде случаев выпадает дисперсная карбонитридная фаза. Встречаются единичные неметаллические включения глобулярной морфологии. Наблюдаемая структура характерна для случая термического улучшения труб на заводе. Подобная микроструктура объясняет отсутствие выраженной площадки текучести рассмотренных трубных сталей.

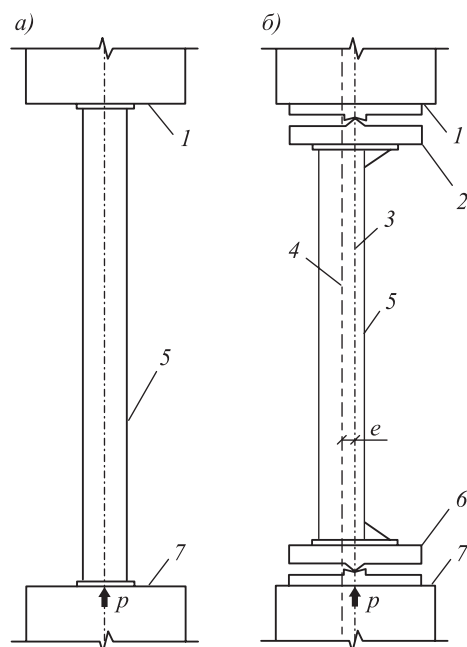


Рис. 3. Схема испытаний труб при центральном (а) и внецентренном (б) сжатии
1 – верхний стол пресса; 2 – верхний нож; 3 – ось пресса; 4 – ось трубы; 5 – труба для испытаний на внецентренное сжатие; 6 – нижний нож; 7 – нижний стол пресса

Ударная вязкость основного металла оценивалась для труб с наибольшей толщиной стенки 530×10 мм на ударных образцах 7,5×10×55 мм с острым надрезом (KCV) по ГОСТ 9454 при температурах $t, ^\circ\text{C}$: +20, –20, –40, –60, –70, –100. Все образцы значительно превосходили нормы ГОСТ 27772–2015: $KCV-60 = 100-120 > 34 \text{ Дж/см}^2$.

Ударная вязкость соединения оценивалась для труб 530×10 мм в соответствии с ГОСТ 6996 на образцах 7,5×10×55 мм с острым V-образным надрезом. Вершина надреза располагалась в зоне линии сплавления с максимальной твердостью металла. Испытания проводились при температурах $t, ^\circ\text{C}$: 20, –20, –60. Все образцы соответствуют требованиям ГОСТ 27772–2015: $KCV-60 = 60-70 > 34 \text{ Дж/см}^2$.

Результаты исследования выявили высокое качество рассматри-

ваемых сталей труб и швов. Далее изучали поведение труб под нагрузкой.

Результаты эксперимента и сравнение с численным и нормативным расчетом. Вычисление коэффициентов устойчивости для труб производилось в соответствии с СП 16.13330.2017 [8, 9]: для центрального сжатия — в соответствии с п. 7.1.3, а для внецентренно-сжатых труб — по п. 9.1.2 [10] как для сжато-изгибаемого элемента, теряющего устойчивость в плоскости изгиба.

Устойчивость труб исследовалась при помощи конечно-элементного комплекса Ansys. Для случаев центрального сжатия задавался случайный эксцентриситет $i/20 + l/750$, где i – радиус инерции; l – высота трубы (Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23–81*)).

Расчетные схемы труб [11, 12] задавались двумерными конечными элементами в виде треугольников. Шаг сетки подбирался путем тестовых итерационных расчетов трубы на устойчивость. При каждой новой итерации шаг сетки уменьшали в 2 раза, пока разность с предыдущим расчетом не стала менее 0,5 %. Размер элемента принимали в соответствии с предпоследней итерацией.

Торцевые узлы трубы между собой соединялись абсолютно жесткими конечными элементами. Снизу жесткий элемент закреплялся шарнирно, сверху по той же оси прикладывалась сжимающая нагрузка с ограничением боковых смещений.

Задача решалась с учетом физической и геометрической нелинейностей. График работы материала принимали по результатам испытаний (рис. 5). Начальное число шагов нелинейной задачи – 50.

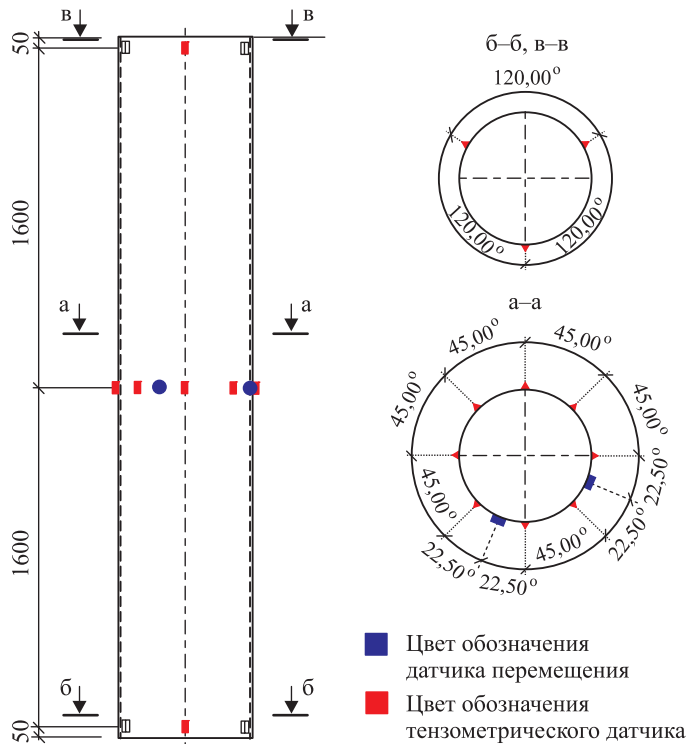


Рис. 4. Схема установки тензометрических датчиков и прогибомеров на трубу

Результаты экспериментальных исследований и сравнение их с нормативными и численными расчетами сведены в табл. 2.

На рис. 6 представлено графическое сравнение результатов [13]. По оси ординат откладывается относительная разница результатов, по оси абсцисс – относительный эксцентриситет. Для всех труб прослеживается закономерное увеличение разницы расчета с экспериментом при увеличении эксцентриситета. Отмечено, что численный расчет дает более точные результаты. Установлено, что погрешность вычислений возрастает с увеличением тонкостенности (D/t) и уменьшением гибкости [14, 15].

Методика расчета устойчивости, заложенная в СП 16.13330, основывается на стержневой модели, и не учитывает фактор потери местной устойчивости стенки. Численная модель, заданная двумерными конечными элементами, способна оценить как местную, так и общую устойчивость, поэтому результаты расчета в Ansys более близки к эксперименту. Однако ни один из расчетов не учитывает неоднородность стали, в частности, наличие электросварных швов. Подобная неоднородная структура материала способна влиять как на местную устойчивость, так и на общую. Степень влияния данной неоднородности, исходя из результатов эксперимента,

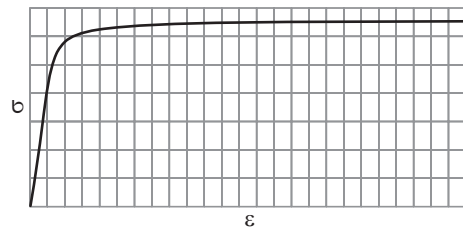


Рис. 5. Типовая диаграмма σ - ϵ трубной стали

Таблица 2. Результаты испытаний, численных и нормативных расчетов

Испытательный образец		σ_T	φ_{Ans}	$\varphi_{СП}$	$\varphi_{исп}$	$\Delta_{СП}, \%$	$\Delta_{Ans}, \%$
сечение, мм	эксцентриситет е, мм						
325×9	120	600	0,444	0,445	0,384	16	16
325×9	70	600	0,561	0,561	0,494	14	14
325×9	0	600	0,878	0,922	0,878	5	0
325×9	120	520	0,465	0,505	0,439	15	6
325×5	120	555	0,443	0,456	0,422	8	5
325×5	70	555	0,564	0,574	0,580	–1	–3
325×5	0	555	0,888	0,929	0,970	–4	–9
530×8	210	555	0,454	0,490	0,396	24	15
530×8	150	555	0,536	0,578	0,498	16	7
530×8	0	555	0,928	0,973	0,875	11	6
630×8	0	380	0,938	0,992	0,964	3	–3
630×8	180	380	0,556	0,607	0,520	17	7
530×10	0	429	0,932	0,980	0,907	8	3
530×10	0	504	0,930	0,976	0,905	8	3
530×10	120	504	0,601	0,629	0,572	10	5
530×10	120	429	0,608	0,638	0,560	14	9
530×10	180	504	0,504	0,532	0,453	18	11
530×10	180	429	0,512	0,539	0,474	14	8
720×7,5	0	573	0,936	0,989	0,848	17	10
720×7,5	225	573	0,512	0,580	0,408	42	26

Примечания. Высота образца $L = 3,3$ м; σ_T – предел текучести, полученный по результатам испытаний; φ_{Ans} – коэффициент устойчивости, по результатам расчета в программе Ansys; $\varphi_{СП}$ – коэффициент устойчивости при центральном и внецентренном сжатии по СП 16.13330.2017; $\varphi_{исп}$ – коэффициент устойчивости по результатам испытаний; $\Delta_{СП} = \frac{\varphi_{СП} - \varphi_{исп}}{\varphi_{исп}} \cdot 100 \%$; $\Delta_{Ans} = \frac{\varphi_{Ans} - \varphi_{исп}}{\varphi_{исп}} \cdot 100 \%$.

зависит от величины эксцентриситета, характера сварного соединения и геометрических размеров трубы.

По результатам исследований можно рекомендовать внести дополнения в действующий свод правил по стальным конструкциям:

- введение критериев потери местной устойчивости труб;
- введение ограничений по тонкостенности применяемых труб;
- учет влияния электросварного соединения на несущую способность труб.

Разработка вышеуказанных дополнений является следующим шагом представленной работы.

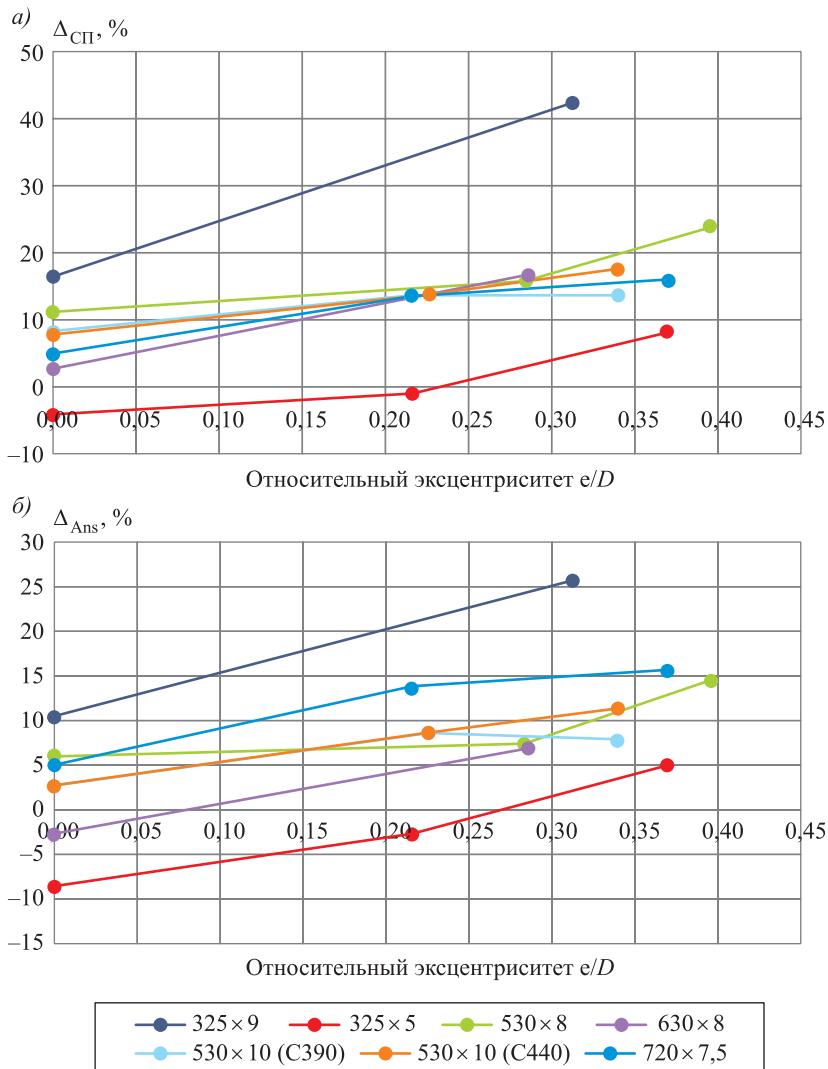


Рис. 6. Сравнение результатов эксперимента с нормативным (а) и численным (б) расчетом

Выводы. 1. По результатам исследований трубных сталей установлены их высокие инженерные свойства, в частности, высокая прочность и ударная вязкость. При расчетах на прочность допускается не учитывать наличие электросварного соединения трубы.

2. Выявлено расхождение результатов эксперимента на устойчивость труб с численными и нормативными расчетами, в большинстве случаев действительная потеря устойчивости происходила раньше расчетной. Наибольшее расхождение эксперимента с нормами 42 %, с конечно-элементной моделью 26 %.

3. Установлены факторы, влияющие на увеличение расхождения результатов расчета с экспериментом:

- форма и свойства сварного соединения;
- увеличение относительного эксцентриситета e/D ;

- увеличение тонкостенности D/t ;
- уменьшение гибкости.

4. Рекомендуется внести дополнения в действующий свод правил по стальным конструкциям (СП 16.13330), связанные с расчетом труб на устойчивость. В действующей редакции норм не учитываются влияние электросварного шва трубы и потеря местной устойчивости. Эксперимент показал, что пренебрежение этими факторами способно привести к значительному завышению несущей способности электросварной трубы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ильясевич С.А. Стальные конструкции из труб. М.: Стройиздат, 1973. 192 с.
2. Трушин С.И., Иванов С.А. Численное исследование устойчивости поллой цилиндрической оболочки с учетом физической и геометрической нелинейностей при различных граничных условиях // Строит. механика и расчет сооружений. 2011. № 5. С. 43–46.
3. Трушин С.И., Иванов С.А. Устойчивость цилиндрических оболочек из упругопластического материала в процессе статического нагружения и разгрузки // Пром. и гражд. стр-во. 2012. № 3. С. 33–34.
4. Конин Д.В. и др. О внедрении новых профилеразмеров и сталей различного класса прочности на примерах наиболее востребованных зданий // Строит. механика и расчет сооружений. 2016. № 2. С. 71–75.
5. Кользеев А.А. Оценка влияния замкнутой формы сечения на устойчивость сжатых стальных стержней трехпоясных ферм // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 11–12. С. 108–113.
6. Zhu J.H., Young B. Numerical modeling and design approach of aluminum alloy tubular columns // Tubular structures XII. Proceedings of the 12th international symposium on tubular structures. Shanghai, China, 2008. P. 553–561.
7. Конин Д.В., Одесский П.Д., Олуромби А.Р. Влияние диаграммы « σ - ϵ » на несущую способность при сжатии труб из стали высокой прочности // Строительство и реконструкция. 2017. № 5. С. 15–19.
8. Лейтес С.Д. Устойчивость сжатых стальных стержней. М.: Госстройиздат, 1952. 309 с.
9. Кудишин Ю.И., Беленя Е.И., Игнатьева В.С. и др. Металлические конструкции. М.: Академия, 2011. 685 с.
10. Блейх Ф. Устойчивость металлических конструкций. М.: Физматгиз, 1959. 544 с.
11. Пиккуль В.В. Устойчивость оболочек // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2012. № 2. С. 81–87.
12. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Устойчивость равновесия конструкций и родственные проблемы. М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2007. 655 с.
13. Кользеев А.А. Сравнительная оценка коэффициентов продольного изгиба сжатых стальных стержней из труб // Изв. вузов. Строительство. 2011. № 3. С. 105–110.
14. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука, 1967. 984 с.
15. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. М.: Физматгиз, 1989. 568 с.

Конин Денис Владимирович, канд. техн. наук; E-mail: konden@inbox.ru
Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций им. В.А. Кучеренко, г. Москва

Олуромби Александр Ричардович, инж.; E-mail: alexolrich@gmail.com
Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций
им. В.А. Кучеренко, г. Москва

Получено после доработки 28.05.18

Konin Denis Vladimirovich, PhD; E-mail: konden@inbox.ru
Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko,
Moscow, Russia

Olurombi Alexander Richardovich, Engineer; E-mail: alexolrich@gmail.com
Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko,
Moscow, Russia

THE BUCKLING ANALYSIS OF DIRECT-WELDING AND SPIRAL-WELDING TUBES MADE OF HIGH-STRENGTH STEELS AT CENTRAL AND ECCENTRIC COMPRESSION BASED ON EXPERIMENT

Investigations of the stability of electrically welded longitudinal and spiral-seam pipes under central and eccentric compression are presented to determine the criteria for loss of local stability, the effect of an electrically welded weld on stability, and comparison of experimental results with numerical and normative calculations. Tests of full-scale samples of pipes on a thousand-ton press are executed. Attention is paid to the study of the engineering properties of tubular steels and electrowelded joints. The results of the investigation are given for the strength, toughness of the base metal and the fusion zone, the micro- and macrostructure of steel. Based on the results of the work, shortcomings in the normative and finite-element calculations have been identified. The characteristics influencing the discrepancy of the obtained results are determined. Conclusions are drawn about the need to add to the current set of rules for steel structures, related to the calculation of the stability of tubular elements.

Key words: electric welded pipes, buckling, eccentricity, flexibility, numerical calculation, experiment.

REFERENCES

1. Il'yasevich S.A. *Stal'nye konstruksii iz trub* [Steel structures made of pipes]. Moscow, Stroyizdat, 1973. 192 p. (in Russian)
2. Trushin S.I., Ivanov S.A. Chislennoe issledovanie ustoychivosti pologoy tsilindricheskoy obolochki s uchetom fizicheskoy i geometricheskoy nelineynostey pri razlichnykh granichnykh usloviyakh [Numerical study of the stability of a poly cylindrical shell with the account of physical and geometric nonlinearities under different border conditions]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural Mechanics and Analysis of Constructions]. 2011. No. 5. Pp. 43–46. (in Russian)
3. Trushin S.I., Ivanov S.A. Ustoychivost' tsilindricheskikh obolochek iz uprugoplasticheskogo materiala v protsesse staticheskogo nagruzheniya i razgruzki [Stability of Elastic-Plastic Cylindrical Shells in the Process of Static Loading and Unloading]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2012. No. 3. Pp. 33–34. (in Russian)
4. Konin D.V. et al. O vnedrenii novykh profilerazмеров i staley razlichnogo klassa prochnosti na primerakh naibolee vostrebovannykh zdaniy [Implementation of new profiles and steels of various strength class on examples of most complained buildings]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural Mechanics and Analysis of Constructions]. 2016. No. 2. Pp. 71–75. (in Russian)

5. Kol' zeev A.A. Otsenka vliyaniya zamknutoy formy secheniya na ustoychivost' szhatykh stal'nykh sterzhney trekhpozasnykh ferm [Estimation of influence of the closed form of section on the stability of compressed steel rods of three-flange trusses]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2012. No. 11-12. Pp. 108–113. (in Russian)
 6. Zhu J.H., Young B. Numerical modeling and design approach of aluminum alloy tubular. *Tubular structures XII. Proceedings of the 12th international symposium on tubular structures*. Shanghai, China, 2008. Pp. 553–561.
 7. Konin D.V., Odesskiy P.D., Olurombi A.R. Vliyanie diagrammy « σ - ϵ » na nesushchuyu sposobnost' pri szhatii trub iz stali vysokoy prochnosti [Influence of stress-strain curve on the stability of high-strength steel pipes]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* [Construction and reconstruction]. 2017. No. 5. Pp. 15–19. (in Russian)
 8. Leytes S.D. Ustoychivost' szhatykh stal'nykh sterzhney [Stability of compressed steel rods]. Moscow, 1952. 309 p. (in Russian)
 9. Kudishin Yu.I., Belenya E.I., Ignat'yeva V.S. et al. Metallicheskie konstruksii [Metal constructions]. Moscow, Akademiya, 2011. 685 p. (in Russian)
 10. Bleykh F. Ustoychivost' metallicheskiy konstruksiy [Buckling strength of metal structures]. Moscow, 1959. 544 p. (in Russian)
 11. Pikul' V.V. Ustoychivost' obolochek [Shells stability]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Engineering and Automation Problems]. 2012. No. 2. Pp. 81–87. (in Russian)
 12. Perel'muter A.V., Slivker V.I. Ustoychivost' ravnovesiya konstruksiy i rodstvennye problemy [Stability of structural equilibrium and related problems]. Moscow, 2007. 655 p. (in Russian)
 13. Kol'zeyev A.A. Sravnitel'naya otsenka koeffitsientov prodol'nogo izgiba szhatykh stal'nykh sterzhney iz trub [Comparative estimation of stress reduction coefficients of compressed steel rods of tubes]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2011. No. 3. Pp. 105–110. (in Russian)
 14. Vol'mir A.S. Ustoychivost' deformiruemykh sistem [Stability of deformable systems]. Moscow, Nauka, 1967. 984 p. (in Russian)
 15. Vlasov V.Z. Tonkostennyye uprugie sterzhni [Thin-walled elastic rods]. Moscow, 1989. 568 p. (in Russian)
-

УДК 69.07

И.И. ПОПОВ, Ю.А. РОССИХИН, М.В. ШИТИКОВА

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЛИЯНИЯ ВОЗРАСТА БЕТОНА
НА ВЕЛИЧИНУ КОНТАКТНОЙ СИЛЫ И ВРЕМЕНИ КОНТАКТА
ПРИ УДАРЕ ПО ВЯЗКОУПРУГОЙ БАЛКЕ***

Статья посвящена анализу экспериментальных исследований влияния возрастных изменений в бетоне на величину контактной силы и времени контакта при ударе упругим шаром по вязкоупругой балке. В результате исследований на ударные воздействия, проведенных на бетонных балках квадратного поперечного сечения в возрасте от 7 до 365 дней, установлено, что контактная сила возрастает с течением времени, при этом время контакта сокращается. Наиболее ярко это выражено на самых ранних возрастах, до двух недель, после чего этот процесс замедляется, а в возрасте после двух месяцев влияние возраста бетона на контактную силу и время контакта несущественно. Также было установлено, что при одинаковой прочности наименьшая контактная сила характерна для образцов, в которых цемент был частично замещен золой-уносом. Это связано с возрастными структурными изменениями в материале балки, а также с эффектом пуццолановых добавок.

К л ю ч е в ы е с л о в а: ударное воздействие, бетонная балка, вязкоупругий материал, контактная сила, время контакта.

Введение. В последние десятилетия наблюдается устойчивая тенденция роста объема строительства [1]. При возведении, эксплуатации и ремонте зданий и сооружений часто возникают риски удара по отдельным несущим строительным конструкциям. Зачастую вследствие ударных воздействий в конструкции наступает локальное разрушение в зоне контакта, которое может привести к потере несущей способности элемента и повлиять на перераспределение усилий в сооружении в целом [2, 3]. Для принятия правильного инженерного решения о дальнейшей эксплуатации элемента после удара возникает необходимость разработки аналитического метода оценки несущей способности конструкции, подвергнутой ударному воздействию.

В работах [4–6] изучалась проблема ударного воздействия на бетонные балки, материал которых рассматривался как вязкоупругий с помощью модели стандартного линейного тела с дробными производными. Были получены аналитические выражения для контактной силы в случае удара стержнем с плоским торцом [4, 5], а также в случае удара сферическим ударником [6]. В обзорной статье [7] представлен критический анализ большого числа

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 17-01-00490. Экспериментальные исследования частично проводились в лаборатории Национального тайваньского технического университета, г. Тайбэй, Китайская Республика Тайвань, во время пребывания первого соавтора в качестве стипендиата Президента РФ для обучения за рубежом, и частично в Центре коллективного пользования им. профессора Ю.М. Борисова в Воронежском государственном техническом университете.

теоретических работ, связанных с применением вязкоупругих моделей с дробными производными при решении динамических задач строительной механики, показаны достоинства и недостатки данных моделей. Основным преимуществом модели с дробными операторами является возможность описать микроструктурные изменения материалов соударяющихся тел в зоне контакта [5–7]. В обзоре [8], посвященном волновой теории удара, отмечается, что при рассмотрении задач ударного взаимодействия число работ, учитывающих вязкоупругость материалов соударяющихся тел, невелико. Особенно редки работы, в которых приводятся результаты экспериментальных исследований, и поэтому они имеют чрезвычайную актуальность и высокую научную ценность, так как могут являться наглядным подтверждением разработанных ранее теоретических моделей и аналитических или численных методик расчетов.

В отечественной и зарубежной литературе [9–22] ставились задачи экспериментального определения контактной силы и времени контакта при ударе по балкам, выполненным из различных материалов. Однако ни в одной из этих работ не учитывались ни вязкоупругость, ни эффект возраста материала. Этой проблеме и посвящена данная работа.

Программа экспериментальных исследований. Перед проведением испытаний балок на удар при раннем возрасте бетона следует убедиться, что балка не разрушится под действием собственного веса и ударной нагрузки. Также необходима информация о стандартных характеристиках исследуемого материала. В связи с этим программа эксперимента включает в себя два раздела: исследование свойств бетона и непосредственно экспериментальное тестирование бетонных балок на ударные воздействия. Первая часть предполагает определение таких характеристик бетона, как прочность на сжатие, динамические модули упругости и сдвига, а также динамический коэффициент Пуассона. С этой целью были изготовлены три партии бетонных образцов различного состава.

Во второй части три бетонные балки, по одной из каждой партии, шарнирно оперты по концам, подвергались ударным воздействиям. Длина балок была принята равной 1 м, поперечное сечение – квадратным со стороной 10 см. В качестве ударника был выбран стальной шар диаметром 4 см, который сбрасывался на середину пролета балки с высоты 10 см. Высота падения и диаметр шара были выбраны из соображений неразрушения балки при ударе. Фотография экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Для предотвращения вертикальных перемещений концы балки туго привязаны проволокой к опорному стержню. Таким образом, концы балок могут вращаться вокруг опорного стержня, однако их вертикальное перемещение ограничено (шарнирная опора).

В данной работе вводится предположение, что отраженные ударные волны не успевают вернуться в зону ударного взаимодействия до момента отскока шарика. Теоретические [18, 19] и экспериментальные [20–22] исследования упругого центрального удара сферического тела по балке показали, что максимальное нагружение вблизи точки контакта не зависит от граничных условий. В этом случае длина балки считается достаточно большой, так что отраженные волны не влияют на напряженное состояние внутри контактной области. В статье С.П. Тимошенко [21] показано, что максимальное значение



Рис. 1. Экспериментальная установка

контактной силы оказалось одинаковым для двух длинных балок различной длины. Эксперименты, проведенные Н. Schweiger [20] и В. Гольдсмитом [22], также подтвердили, что граничные условия не влияют на контактную силу.

Методика определения времени контактного взаимодействия, используемая в данной работе, аналогична процедуре нахождения времени контакта эхо-импульсным методом [15]. Данное время определяется как полупериод первого колебания балки по акселерограмме. Действительно, продолжительность контактного взаимодействия однозначно определяется как промежуток времени, в течение которого контактная сила изменялась от своего начального (нулевого) значения в момент времени $t = 0$ до своего конечного (снова нулевого) значения в момент отскока ударника. При этом внутри данного временного интервала контактная сила достигает своего максимума.

Контактная сила может быть определена из уравнения совместного движения ударника и мишени [6]. График изменения контактной силы представлен на рис. 2.

Ранее в работе [6] авторы построили аналогичные зависимости безразмерной контактной силы от безразмерного времени, подсчитанные аналитически. При этом вязкоупругие свойства материала балки моделировались с помощью модели стандартного линейного тела с дробными производными. Вышеупомянутые зависимости были приведены для различных значений параметра дробности, в качестве которого выступает порядок дробной производной.

Пропорции бетонных смесей. Эксперименты проводились в лабора-

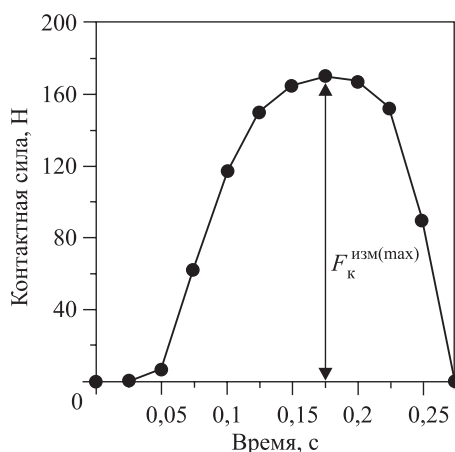


Рис. 2. График изменения контактной силы в процессе удара для случая удара упругим сферическим ударником по вязкоупругой бетонной балке

тории Национального тайваньского технического университета (NTUST) в рамках совместного научно-исследовательского проекта. Расчет состава эталонной бетонной смеси 1 для балок был произведен на основе стандарта АСІ С211.91. Основные компоненты бетонной смеси следующие: цемент – обыкновенный портландцемент типа I, произведенный Тайваньской цементной корпорацией; вода – обыкновенная водопроводная; мелкий и крупный заполнители – речной песок и гравий соответственно; суперпластификатор – суперпластификатор типа G по спецификации ASTM C494, произведенный тайваньской компанией Ю-Линь (рН = 4,34, плотность = 1090 кг/м³, содержание хлора = 44 мг/кг). Бетонные смеси 2 и 3 были рассчитаны аналогичным образом, но с замещением цемента золой-уносом в количестве 10 и 20 % по массе соответственно (табл. 1).

Таблица 1. Пропорции бетонных смесей, рассчитанные на 1 м³ в соответствии с АСІ С211.91, кг

Смесь, №	Вода	Цемент	Зола-унос	Мелкий заполнитель	Крупный заполнитель	Супер-пластификатор
1	194,00	473,17	0,00	768,69	932,38	2,20
2	194,00	425,85	47,32	749,72	932,38	2,20
3	194,00	378,54	94,63	730,74	932,38	2,20

Результаты экспериментальных исследований. График развития прочности бетона приведен на рис. 3. Быстрый набор прочности бетонными образцами объясняется низким водоцементным соотношением, отсутствием в бетонной смеси дополнительных цементирующих добавок, а также применением высококачественного суперпластификатора. Очевидно, что прочность бетонных балок позволяет производить их испытания на удар даже на ранних возрастах. Как и ожидалось, образцы, содержащие золу-унос, в первые дни набирают прочность несколько медленнее образцов на полностью цементном вяжущем, причем чем выше содержание золы, тем более ярко

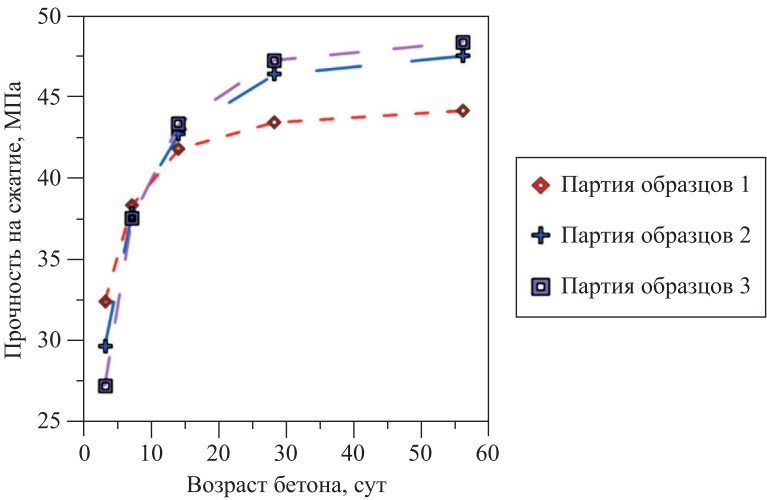


Рис. 3. Прочность на сжатие бетонных образцов

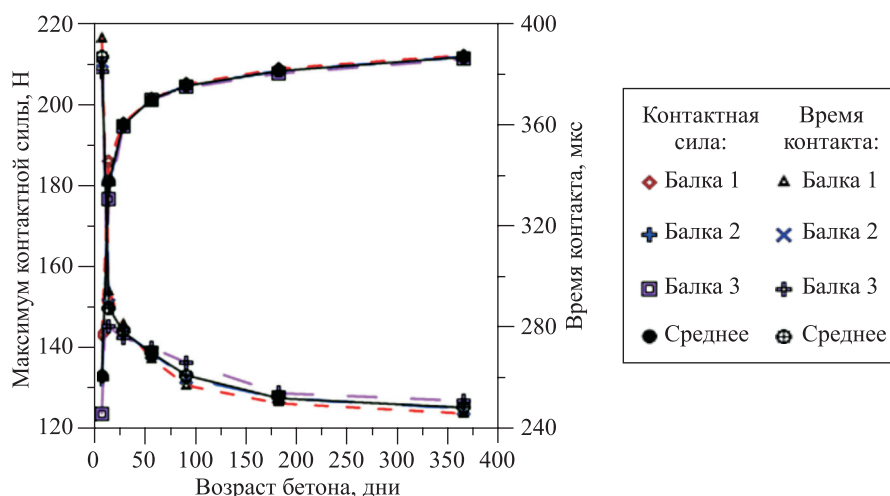


Рис. 4. Зависимости максимума контактной силы и времени контакта от возраста бетона

проявляется данная тенденция. Однако после 14 дней прочность на сжатие образцов с содержанием золы-уноса начинает превосходить прочность образцов на цементном вяжущем. Это объясняется эффектом пуццолановых добавок.

В результате испытаний балок на ударное воздействие было установлено, что максимум контактной силы увеличивается с возрастом бетона. На рис. 4 показаны зависимости максимума контактной силы и времени контакта от возраста бетона. Из графика видно, что контактная сила увеличивается с течением времени, причем наиболее существенные изменения происходят на ранних возрастах, т.е. до 14 дней. После этого данный процесс постепенно замедляется и становится практически незначительным после 56 дней. Так, среднее значение максимума контактной силы в возрасте 14 дней составило 180,865 Н, т.е. увеличилось на 35,96 % по сравнению с соответствующим значением в возрасте 7 дней, равным 133,024 Н. При сравнении полученных значений в возрасте 14 и 28 дней, 180,865 и 194,874 Н соответственно, увеличение контактной силы составило уже 7,75 %. В возрасте 56 дней «прирост» контактной силы 3,27 %, после чего на всех возрастах данное значение колеблется около 1,5 %.

При рассмотрении зависимости контактной силы от прочности бетона (рис. 5) наблюдается увеличение контактной силы в процессе набора прочности. Как видно из рисунка, при одинаковой прочности на сжатие для первой партии образцов, не содержащей золы-уноса, обнаружены наибольшие значения максимума контактной силы. С добавлением золы-уноса и с увеличением ее содержания величина контактной силы при одинаковой прочности снижается. Таким образом, введение в состав бетонной смеси золы-уноса уменьшает значения контактной силы при ударе.

Время контактного взаимодействия в данном случае имеет обратную тенденцию: оно постоянно уменьшается. Из графика зависимости продолжительности контакта от возраста бетона (см. рис. 4) очевидно, что наиболее существенные изменения времени контакта происходят в период до 14 дней,

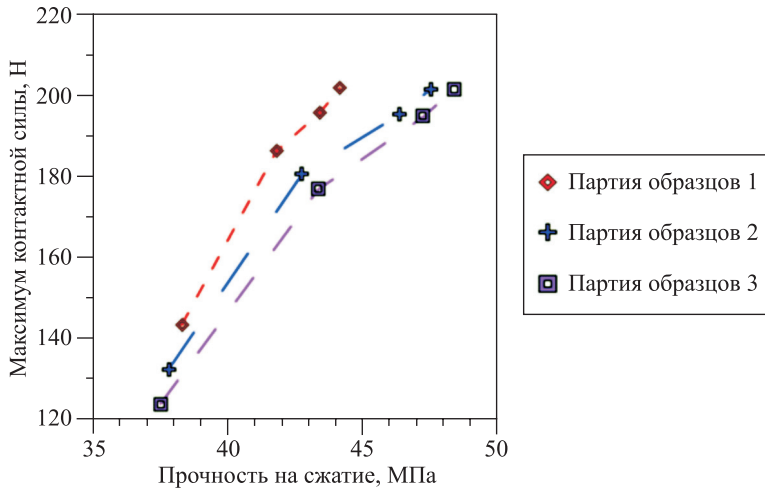


Рис. 5. Зависимость максимума контактной силы от прочности бетона на сжатие

где среднее значение времени контакта уменьшается с 387 до 288 мкс на 25,6 %. В возрасте 28 дней уменьшение составляет лишь 3,5 %. На более поздних возрастах бетона изменения продолжительности контактного взаимодействия пренебрежимо малы.

Для случая, когда и ударник, и балка являются упругими телами, время контакта может быть оценено при помощи контактного закона Герца [22]

$$T_{\text{к}}^{\text{упр}} = 4,53 \left[\frac{(\delta_1 + \delta_2)m_1}{\sqrt{RV_0}} \right]^{\frac{2}{5}}, \quad (1)$$

где $\delta_1 = \frac{1-v_1^2}{\pi E_1}$, $\delta_2 = \frac{1-v_2^2}{\pi E_2}$, m_1 – масса ударника;

E_1 и v_1 – модуль упругости и коэффициент Пуассона ударника;

E_2 и v_2 – модуль упругости и коэффициент Пуассона мишени соответственно;

H – высота падения ударника;

R – радиус шара;

$V_0 = (2gH)^{1/2}$ – начальная скорость удара.

Для оценки применимости данной формулы для случая удара упругим шаром по вязкоупругой балке подставим соответствующие значения $E_1 = 210$ ГПа, $v_1 = 0,3$, $R = 0,02$ м, $H = 0,1$ м, $m_1 = \rho V = (4/3)\pi R^3 \rho = 0,26$ кг, а значения E_2 и v_2 примем исходя из экспериментальных данных. Результаты расчетов по формуле (1) сравним с экспериментальными данными (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что формула (1) дает существенно заниженные значения времени контакта и не может быть применена для случая удара упругим сферическим ударником по вязкоупругой бетонной балке. Это объясняется тем, что формула (1) не учитывает вязкоупругих свойств бетонной балки, т.е. не отражает реальной физической картины рассматриваемой задачи.

Таблица 2. Сравнение результатов расчетов времени контакта по формуле (1) с экспериментально полученными значениями времени контакта

Возраст бетона, дни	E_2 , ГПа	ν_2	$T_K^{\text{упр}}$, мкс	$T_K^{\text{экс}}$, мкс
3	31,553	0,328	190,42	—
7	34,060	0,314	186,09	386,67
14	35,506	0,300	184,06	287,67
28	38,014	0,217	182,67	278,33
56	39,693	0,201	180,44	269,87
91	40,703	0,185	179,30	261,00
182	41,031	0,181	178,91	252,00
365	41,562	0,176	178,24	248,33

Примечание. $T_K^{\text{упр}}$ – время контакта, вычисленное по формуле (1) и $T_K^{\text{экс}}$ – экспериментально измеренное время контакта.

Аналогичным образом можно показать, что формулы, которые обычно применяются в инженерной практике для оценки контактной силы при соударении жестких или упругих тел, оказываются совершенно бесполезными в рамках рассматриваемой задачи. Например, значения контактной силы, вычисленной как отношение импульса ударника ко времени контакта ($F_K^{\text{имп}} = m_1 V_0 / T_K$), являются существенно завышенными величинами по сравнению с экспериментально полученными значениями контактной силы (табл. 3).

Другой подход показан в обзоре [3], где бетонная балка моделируется как сосредоточенная масса, т.е. рассматривается контактное взаимодействие между двумя массами без учета свойств мишени и ударника, что также не отражает действительности. Следовательно, контактная сила может быть определена либо с учетом вязкоупругих свойств бетона по методикам, изложенным в работах [4–6], либо измерена экспериментально.

Так, влияние возраста бетона на контактную силу и время контакта при ударе по вязкоупругой бетонной балке для случая, когда ударником являлся прямоугольный стержень с плоским торцом, исследовалось экспериментально в работе [23], при этом влияние содержания отдельных компонентов бетонной смеси на исследуемые параметры не изучалось. Однако авторам удалось выявить некоторые общие зако-

Таблица 3. Сравнение экспериментальных значений контактной силы со значениями, подсчитанными без учета вязкоупругих свойств бетона

Возраст бетона, дни	$T_K^{\text{экс}}$, мкс	$F_K^{\text{имп}}$, Н	$F_K^{\text{экс}}$, Н
7	386,667	946,170	133,024
14	287,667	1271,793	180,865
28	278,333	1314,440	194,874
56	269,867	1355,679	201,256
91	261,000	1401,734	204,590
182	252,000	1451,796	208,243
365	248,333	1473,232	211,671

номерности, которые подтвердились результатами данного исследования: время контакта сокращается, а контактная сила возрастает по мере роста возраста бетона, и наиболее значительные изменения происходят именно в период до 14 дней.

Выводы. В данной работе рассмотрена задача ударного взаимодействия упругого стального шара с вязкоупругой бетонной балкой. Основной целью являлось экспериментальное определение контактной силы и времени контактного взаимодействия, а также исследование изменения данных параметров для балок различного возраста.

Установлено, что среднее значение максимума контактной силы возрастает с возрастом бетона, из которого изготовлена балка, в то время как продолжительность контактного взаимодействия сокращается. При этом наиболее существенные изменения происходят на ранних возрастах бетона, до 14 дней, после чего данный процесс замедляется и дальнейшие изменения становятся незначительными. Контактная сила возрастает на 35,96 % с 133,024 Н при возрасте бетона в 7 дней до 180,865 Н при двухнедельном возрасте. Время контакта убывает на 25,6 % с 387 до 288 мкс соответственно. Данные явления связаны со структурными изменениями в бетоне в процессе его твердения и набора прочности, а также эффектом добавления пуццолановых добавок.

Опытным путем установлено, что при неучете вязкоупругих свойств бетона в задаче удара упругим сферическим ударником по вязкоупругой балке традиционные аналитические расчеты контактной силы и времени контакта дают неверные результаты. Более достоверные значения данных параметров могут быть получены либо экспериментально, либо с применением реологических моделей, учитывающих вязкоупругость материала балки [4–6].

Также в ходе исследования образцов различных составов бетонных смесей было выявлено, что при одинаковой прочности на сжатие наименьшие значения контактной силы достигнуты путем частичного замещения цемента золой-уносом, причем чем большее количество цемента замещено, тем больше снижено значение контактной силы при ударе. Результаты данных исследований могут быть применены при проектировании составов бетонных смесей для конструкций, подвергающихся ударным воздействиям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барановская Н.И. Тенденции развития комплексного жилищно-гражданского строительства в России // Вестн. граждан. инженеров. 2013. № 2. С. 191–196.
2. Забегаев А.В., Тамразян А.Г. Основные положения рекомендаций по проектированию железобетонных конструкций, подверженных аварийным ударным воздействиям // Методы расчета и конструирования железобетонных конструкций: Сб. науч. тр. М.: МИСИ, 1996. С. 42–57.
3. Lu Y. Impact on reinforced concrete structures // Contribution to the Encyclopedia of Continuum Mechanics. Springer, 2018. P. 1–28.
4. Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V., Popov I.I. Dynamic response of a hereditarily elastic beam with Rabotnov's kernel impacted by an elastic rod // Proceedings of the 2014 International Conference on Mathematical Models in Applied Studies (MMAS'14), Mathematics and Computers in Science and Engineering Series. Vol. 32. Saint Petersburg State Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia, September 23–25, 2014. P. 25–31.

5. Popov I.I., Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V., Chang T.P. Impact response of a viscoelastic beam considering the changes of its microstructure in the contact domain // *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2015. Vol. 19, No. 4. P. 455–481.
6. Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V., Popov I.I. Dynamic response of a viscoelastic beam impacted by a viscoelastic sphere // *Computers and Mathematics with Applications*. 2017. Vol. 13, No. 6. P. 970–984.
7. Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V. Application of fractional calculus for dynamic problems of solid mechanics: Novel trends and recent results // *Applied Mechanics Reviews*. 2010. Vol. 63, No. 1. Paper ID 01801, 52 p.
8. Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V. Transient response of thin bodies subjected to impact: Wave approach // *The Shock and Vibration Digest*. 2007. Vol. 39, No. 4. P. 273–309.
9. Расторгуев Г.И., Снисаренко С.И. Идентификация форм импульсов при поперечном ударе по композитным балкам и пластинам // *Прикладная математика и техническая физика*. 2009. Т. 50, № 6. С. 126–133.
10. Hu N., Fukunaga H., Matsumoto S., Yan A., Peng X. An efficient approach for identifying impact force using embedded piezoelectric sensors // *International Journal of Impact Engineering*. 2007. Vol. 34. P. 1258–1271.
11. Martin M., Doyle J. Impact force identification from wave propagation responses // *International Journal of Impact Engineering*. 1996. Vol. 18, No. 1. P. 65–77.
12. Mahajan P., Dutta A. Adaptive computation of impact force under low velocity impact // *Computers and Structures*. 1999. Vol. 70, No. 2. P. 229–241.
13. Zeebroeck M.V., Tijskens E., Liedekerke P.V., Deli V., Baerdegmaecker J.D., Ramon H. Determination of the dynamical behavior of biological materials during impact using a pendulum device // *Journal of Sound and Vibration*. 2003. Vol. 266. P. 465–480.
14. Tong J., Chiu C., Wang C., Liao S. Influence of rebars on elastic-wave-based synthetic aperture focusing technique images for detecting voids in concrete structures // *NDT & E International*. 2014. Vol. 68. P. 33–42.
15. Pristov E., Dalton W., Piscsalko G., Likins G. Comparison of impact-echo and broadband input to determine concrete thickness // *Proceedings of a Joint Conference of the 7th Structural Materials Technology: NDE/NDT for Highway and Bridges and the 6th International Symposium on NDT in Civil Engineering*. St. Louis, Missouri, U.S. 2006. P. 254–261.
16. Shrinivas L.G., Ramakrishna D. A solution to the inverse problem of impact force determination from structural responses // *International Journal of Engineering and Innovative Technology*. 2012. Vol. 1, No. 3. P. 192–196.
17. Madheswaran C.K., Dattatreya J.K., Ambily P.S., Karansingh P.R. Investigation on behaviour of reinforced geopolymer concrete slab under repeated low velocity impact loading // *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2014. Vol. 3, No. 3. P. 10775–10786.
18. Schweiger H. A simple calculation of the transverse impact on beams and its experimental verification // *Experimental Mechanics*. 1965. Vol. 5, No. 11. P. 378–384.
19. Schweiger H. Die maximale mechanische Beanspruchung beim zentralen Balkenquerstoß // *ZAMM*. 1965. Vol. 45, No. 7–8. P. 499–506.
20. Schweiger H. Central deflection of a transversely struck beam // *Experimental Mechanics*. 1970. Vol. 10, No. 4. P. 166–169.
21. Timoshenko S. Zur Präge nach der Wirkung eines Stoßes auf einen Balken // *Math. Phys.* 1913. Vol. 62. P. 198–209.

22. Гольдсмит В. Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел / Пер. с англ. М.С. Лужиной и О.В. Лужина. М.: Стройиздат, 1965. 448 с.
23. Попов И.И., Chang Т.Р., Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V. Experimental study of concrete aging effect on the contact force and contact time during the impact interaction of an elastic rod with a viscoelastic beam // Journal of Mechanics. 2017. Vol. 33, No. 3. P. 317–322.

Попов Иван Иванович, асп.; E-mail: 89042149140@mail.ru

Воронежский государственный технический университет, Центр по фундаментальным исследованиям в области естественных и строительных наук

Россихин Юрий Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, проф.

Воронежский государственный технический университет, Центр по фундаментальным исследованиям в области естественных и строительных наук

Шитикова Марина Вячеславовна, д-р физ.-мат. наук, проф.;

E-mail: mvs@vgasu.vrn.ru

Воронежский государственный технический университет, Центр по фундаментальным исследованиям в области естественных и строительных наук

Получено после доработки 31.05.18

Popov Ivan Ivanovich, Post-graduate Student; E-mail: 89042149140@mail.ru

Voronezh State Technical University, Research Center on Dynamics of Solids and Structures, Russia

Rossikhin Yuriy Alexeevich, DSc, Professor

Voronezh State Technical University, Research Center on Dynamics of Solids and Structures, Russia

Shitikova Marina Vyacheslavovna, DSc, Professor; E-mail: mvs@vgasu.vrn.ru

Voronezh State Technical University, Research Center on Dynamics of Solids and Structures, Russia

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE CONCRETE AGE ON THE CONTACT FORCE AND CONTACT TIME DURING THE IMPACT UPON A VISCOELASTIC BEAM

The given paper is devoted to the analysis of experimental study of the concrete aging effect on the contact force and contact time during the impact upon a viscoelastic beam. According to the experimental data for concrete beams of squared cross-sections provided for the age interval from 7 to 365 days, it has been found that contact force increases with the concrete age, whereas the contact duration decreases. The most significant changes occur at the ages less than 14 days, after that the process slows down, and at the age of two months the effect of concrete aging on the contact force and contact time becomes insignificant. It has been also revealed that at the same magnitude of the compressive strength the least values of the contact force were obtained for those samples where cement was partially replaced by Type F fly ash. This is connected with the structural changes in concrete and due to the effect of pozzolanic admixtures.

Key words: impact interaction, concrete beam, viscoelastic material, contact force, contact time.

REFERENCES

1. Baranovskaya N.I. Tendentsii razvitiya kompleksnogo zhilishchno-grazhdanskogo stroitel'stva v Rossii [Trends in Civil Engineering development in Russia] Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]. 2013. No. 2. Pp. 191–196. (in Russian)

2. Zabegaev A.V., Tamrazyan A.G. Osnovnye polozheniya rekomendatsiy po proektirovaniyu zhelezobetonnykh konstruksiy, podverzhennykh avariynym udarnym vozdeystviyam [The main concepts of the recommendations on design of reinforced concrete structures exposed to destructive impact loadings]. Metody rascheta i konstruirovaniya zhelezobetonnykh konstruksiy: Sbornik nauchnykh trudov [Design Methods for Reinforced Concrete Structures. Collection of scientific papers]. Moscow, 1996. Pp. 42–57. (in Russian)
3. Lu Y. Impact on reinforced concrete structures. Contribution to the Encyclopedia of Continuum Mechanics. Springer, 2018. Pp. 1–28.
4. Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V., Popov I.I. Dynamic response of a hereditarily elastic beam with Rabotnov's kernel impacted by an elastic rod. Proceedings of the 2014 International Conference on Mathematical Models in Applied Studies (MMAS'14), Mathematics and Computers in Science and Engineering Series. Vol. 32. Saint Petersburg State Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia, September 23–25, 2014. Pp. 25–31.
5. Popov I.I., Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V., Chang T.P. Impact response of a viscoelastic beam considering the changes of its microstructure in the contact domain. Mechanics of Time-Dependent Materials. 2015. Vol. 19, No. 4. Pp. 455–481.
6. Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V., Popov I.I. Dynamic response of a viscoelastic beam impacted by a viscoelastic sphere. Computers and Mathematics with Applications. 2017. Vol. 13, No. 6. Pp. 970–984.
7. Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V. Application of fractional calculus for dynamic problems of solid mechanics: Novel trends and recent results. Applied Mechanics Reviews. 2010. Vol. 63, No. 1. Paper ID 01801, 52 p.
8. Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V. Transient response of thin bodies subjected to impact: Wave approach. The Shock and Vibration Digest. 2007. Vol. 39, No. 4. Pp. 273–309.
9. Rastorguev G.I., Snisarenko S.I. Identifikatsiya form impul'sov pri poperechnom udare po kompozitnym balkam i plastinam [Identification of pulse shapes during transverse impact on composite beams and plates]. Prikladnaya matematika i tekhnicheskaya fizika [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]. 2010. Vol. 50, No. 6. Pp. 1020–1025. (in Russian)
10. Hu N., Fukunaga H., Matsumoto S., Yan A., Peng X. An efficient approach for identifying impact force using embedded piezoelectric sensors. International Journal of Impact Engineering. 2007. Vol. 34. Pp. 1258–1271.
11. Martin M., Doyle J. Impact force identification from wave propagation responses. International Journal of Impact Engineering. 1996. Vol. 18, No.1. Pp. 65–77.
12. Mahajan P., Dutta A. Adaptive computation of impact force under low velocity impact. Computers and Structures. 1999. Vol. 70, No. 2. Pp. 229–241.
13. Zeebroeck M.V., Tijskens E., Liedekerke P.V., Deli V., Baerdemaeker J.D., Ramon H. Determination of the dynamical behavior of biological materials during impact using a pendulum device. Journal of Sound and Vibration. 2003. Vol. 266. Pp. 465–480.
14. Tong J., Chiu C., Wang C., Liao S. Influence of rebars on elastic-wave-based synthetic aperture focusing technique images for detecting voids in concrete structures. NDT & E International. 2014. Vol. 68. Pp. 33–42.
15. Pristov E., Dalton W., Piscsalko G., Likins G. Comparison of impact-echo and broadband input to determine concrete thickness. Proceedings of a Joint Conference of the 7th Structural Materials Technology: NDE/NDT for Highway and Bridges and the 6th International Symposium on NDT in Civil Engineering. St. Louis, Missouri, U.S. 2006. Pp. 254–261.

16. Shrinivas L.G., Ramakrishna D. A solution to the inverse problem of impact force determination from structural responses. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*. 2012. Vol. 1, No. 3. Pp. 192–196.
 17. Madheswaran C.K., Dattatreya J.K., Ambily P.S., Karansingh P.R. Investigation on behaviour of reinforced geopolymer concrete slab under repeated low velocity impact loading. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2014. Vol. 3, No. 3. Pp. 10775–10786.
 18. Schweiger H. A simple calculation of the transverse impact on beams and its experimental verification. *Experimental Mechanics*. 1965. Vol. 5, No. 11. Pp. 378–384.
 19. Schweiger H. Die maximale mechanische Beanspruchung beim zentralen Balkenquerstoß. *ZAMM*. 1965. Vol. 45, No. 7-8. Pp. 499–506.
 20. Schweiger H. Central deflection of a transversely struck beam. *Experimental Mechanics*. 1970. Vol. 10, No. 4. Pp. 166–169.
 21. Timoshenko S. Zur Präge nach der Wirkung eines Stoßes auf einen Balken. *Math. Phys.* 1913. Vol. 62. Pp. 198–209.
 22. Goldsmith W.E. *Impact: the theory and physical behaviour of colliding solids*. London: Arnold, 1960.
 23. Popov I.I., Chang T.P., Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V. Experimental study of concrete aging effect on the contact force and contact time during the impact interaction of an elastic rod with a viscoelastic beam. *Journal of Mechanics*. 2017. Vol. 33, No. 3. Pp. 317–322.
-

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
«СТРОИТЕЛЬСТВО»

Издается 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
- Гидротехническое 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 1-е полугодие по каталогу «Роспечать» 2018 г.

Каталожная цена за 6 месяцев – 4200 р.

Цена отдельного номера – 700 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».

В н и м а н и е!

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 Pp., в конце – (in Russian).

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

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. Обязательны сведения о разработчиках: фамилия, имя, отчество полностью; звания; контактная информация, место работы.

ББК 38
И 33
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО**

№ 6 (714) 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 28.06.18. Формат 70×108 $\frac{1}{16}$
Усл. печ. л. 11,20+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 3030

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