

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РФ

МЕЖДУНАРОДНАЯ ОБЩЕСТВЕННАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ СОДЕЙСТВИЯ РАЗВИТИЮ
СТРОИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 3 (711)

Март 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. Балызаников, д-р техн. наук, проф., СГЭУ, Самара
А.А. Волков, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИУ МГСУ, Москва
В.А. Воробьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., МАДГТУ (МАДИ), Москва
В.Г. Гагарин, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИИСФ, Москва
М.А.о. Гаджиев, д-р техн. наук, проф., АУАС, Баку, Азербайджан
У. Гайсбауэр, д-р – инж., Институт аэрогазодинамики, Университет 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. Карапулов, д-р техн. наук, проф., СГУПС, Новосибирск
В.И. Колчунов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ЮЗГУ, Курск
В.И. Костин, д-р техн. наук, проф. (заместитель главного редактора), НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
Г.Б. Лебедев, канд. техн. наук, доц. (заместитель главного редактора), НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
П. Либланг, д-р, проф., Высшая техническая школа, Университет прикладных наук, Кёльн, Германия
Л.С. Ляхович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ТГАСУ, Томск
В.М. Митасов, д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
В.И. Морозов, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург
Ж.С. Нуужинов, д-р техн. наук, проф., КазМИРР, Караганда, Казахстан
Ю.П. Панибратов, акад. РААСН, д-р экон. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург
А.И. Полищук, д-р техн. наук, проф., КубГАУ, Краснодар
Г.И. Пустоветов, чл.-кор. РААСН, д-р архитектуры, проф., НГУАДИ, Новосибирск
Н.А. Сапрыкина, поч. чл. РААСН, д-р архитектуры, проф., МАРХИ, Москва
В.Г. Себешев, поч. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф. (главный редактор), НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
Ю.Л. Сколубович, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
И.С. Соболь, д-р техн. наук, проф., ННГАСУ, Нижний Новгород
Ю.А. Феофанов, д-р техн. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург
Й.В. Ху, PhD, проф., Национальный университет г. Инчхон, Республика Корея
Н.А. Цветков, д-р техн. наук, проф., ТГАСУ, Томск
Е.М. Чернышов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ВГТУ, Воронеж
В.Р. Чупин, д-р техн. наук, проф., ИНИТУ, Иркутск
Е.Ч. Шин, PhD, проф., Национальный университет г. Инчхон, Республика Корея

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

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

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ СООРУЖЕНИЙ

Игнатьев А.В., Игнатьев В.А., Гамзатова Е.А. Расчет тонких пластин по методу конечных элементов в форме классического смешанного метода с исключением перемещений конечных элементов как жесткого целого	5
---	---

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ

Балакин П.Д., Красотина Л.В., Корчагин П.А. Частоты собственных колебаний арочных сводов из профицированного настила	14
---	----

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Максимова И.Н., Ерофеев В.Т., Макридин Н.И. Кинетические параметры гидратационного структурообразования и твердения цементного камня в возрасте до 9,5 лет после пропарки	24
--	----

Селяев В.П., Седова А.А., Куприяшкина Л.И., Осипов А.К., Баландина А.В. Влияние химического состава воды на прочность цементного камня, наполненного природными цеолитами	34
--	----

Коровкин Д.И., Низина Т.А., Макарова Л.В., Балыков А.С., Володин В.В. Анализ изменения прочностных показателей мелкозернистых бетонов в зависимости от влажностного состояния и температуры испытаний	43
--	----

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

Герасимов В.В., Иконникова А.В., Светышев Н.В., Исаков А.К. Исследование технологии планирования комплексных строительных процессов в условиях неопределенности	52
--	----

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ, ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКОЛОГИИ

Чжан Гуаньин. Использование библиотеки элементов доугун для моделирования Дадяня храма Баогосы в Китае	62
---	----

Блажнов А.А. Сравнительная оценка типов зимних теплиц для фермерских хозяйств	71
--	----

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Александров А.С., Александрова Н.П., Семенова Т.В. Применение принципа энергетической эквивалентности сплошных и поврежденных тел к расчету асфальтобетонных покрытий по критериям прочности и пластичности	79
--	----

Кузавов В.Т., Дегтярев В.В. Образование микротрещин при динамических и статических нагрузлениях материалов	89
---	----

В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

Адищев В.В., Мальцев В.В., Шульга В.К. Исследование напряженно-деформированного состояния в балках с заранее организованными трещинами	95
---	----

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. 3 (711)
March 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

Responsible secretary N.V. Bitkina

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

CONTENTS

THEORY OF STRUCTURES

- Ignat'ev A.V., Ignat'ev V.A., Gamzatova E.A.** Analysis of thin plates with excluding the displacements of the finite element as an absolutely rigid body by the fem in the form of a classical mixed method 5

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND STRUCTURES. BASES AND FOUNDATIONS

- Balakin P.D., Krasotina L.V., Korchagin P.A.** Frequencies of own vibrations of arctic consists from the profiled flood 14

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

- Maksimova I.N., Erofeev V.T., Makridin N.I.** Kinetic parameters of hydraulic structural formation and cement stone in age up to 9,5 years after preparation 24

- Selyaev V.P., Sedova A.A., Kupriyashkina L.I., Osipov A.K., Balandina A.B.** The influence of water chemistry on durability of cement stone, filled with natural zeolites 34

- Korovkin D.I., Nizina T.A., Makarova L.V., Balykov A.S., Volodin V.V.** Analysis of changes in strength characteristics of fine-grained concrete, depending on moisture status and temperature tests 43

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION

- Gerasimov V.V., Ikonnikova A.V., Svetyshev N.V., Isakov A.K.** Technology research planning of complex construction processes in conditions of uncertainty 52

SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE, TOWN PLANNING AND ECOLOGY

- Zhang Guanying.** Using the library elements dougong for modeling Dalian Baoguosi temple in China 62

- Blazhnov A.A.** Comparative assessment of types of winter greenhouses for farms 71

SECTION OF SCIENTIFIC METHODOLOGY

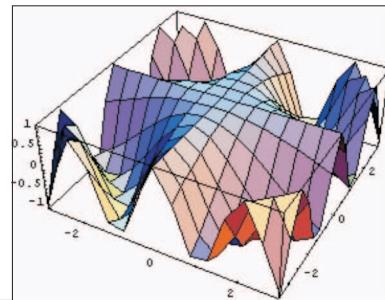
- Aleksandrov A.S., Aleksandrova N.P., Semenova T.V.** Application of the principle of energy equivalence of continuous and damaged bodies to calculation of asphalt concrete coatings by strength and plasticity criteria 79

- Kuzavov V.T., Degtyarev V.V.** Formation of micro-fracture under dynamic and static loading of materials 89

IN HIGHER SCHOOL LABS

- Adishchev V.V., Mal'tsev V.V., Shul'ga V.K.** Investigation of stress-strain state in the beam with preformed cracks 95

ТЕОРИЯ СООРУЖЕНИЙ



УДК 624.073.042

А.В. ИГНАТЬЕВ, В.А. ИГНАТЬЕВ, Е.А. ГАМЗАТОВА

РАСЧЕТ ТОНКИХ ПЛАСТИН ПО МЕТОДУ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ФОРМЕ КЛАССИЧЕСКОГО СМЕШАННОГО МЕТОДА С ИСКЛЮЧЕНИЕМ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КАК ЖЕСТКОГО ЦЕЛОГО

Статья посвящена актуальной проблеме исключения смещений конечного элемента как жесткого целого при расчете по методу конечных элементов. Эта проблема решается в явном виде в рамках разрабатываемого авторами метода конечных элементов в форме классического смешанного метода. При использовании конечных элементов в виде стержней или треугольных пластинок проблема учета смещений КЭ (конечного элемента) как жесткого целого не возникает, так как для этих КЭ используется статически определимая основная система смешанного метода. При такой основной системе конечный элемент при смещениях, введенных в основную систему связей, вращается как механизм, не деформируясь. В прямоугольном конечном элементе-пластинке смещение введенных в основную систему связей приводит к его деформации. Разложение этих смещений на смещения КЭ как жесткого целого, не вызывающие появления реакций во введенных связях, и смещения, вызывающие изгиб КЭ, позволяет построить алгоритм исключения перемещений КЭ как жесткого целого из разрешающей системы уравнений. Корректность и эффективность такого исключения показана на примере расчета пластиинки.

Ключевые слова: пластиинка, исключение перемещений как жесткого целого, МКЭ в форме классического смешанного метода.

Алгоритм получения выражений для элементов матрицы откликов изгибающего конечного элемента пластины, описанный авторами в работах [1, 2] и основанный на использовании принципа возможных изменений напряженно-деформированного состояния, не является одинаковым для всех блоков матрицы откликов и не предусматривает для прямоугольных изгибающихся конечных элементов пластиинок исключение перемещений как жесткого целого.

Актуальной проблеме учета смещений конечного элемента как жесткого целого посвящено большое количество работ [3–8]. Но использованные в

этих работах приемы не дают общего решения проблемы, так как имеют довольно узкую область применения.

Сложность предлагаемых алгоритмов исключения из системы разрешающих уравнений перемещений конечных элементов как жесткого целого объясняет неослабевающий интерес к этой проблеме.

В данной работе эта проблема решается в явном виде в рамках разрабатываемого авторами метода конечных элементов в форме классического смешанного метода. Как отмечалось ранее в работах [1, 2], она автоматически снимается при использовании стержневых и пластинчатых изгибающихся треугольных конечных элементов, так как для них используется статически определимая основная система смешанного метода. При такой основной системе конечный элемент при смещениях опорных связей работает кинематически как механизм, не деформируясь.

В прямоугольном изгибающемся конечном элементе смещение опорных связей в основной системе приводит к его деформации.

Однако эта основная система позволяет без затруднений решить проблему исключения из разрешающих уравнений перемещений конечных элементов как жесткого целого.

На рис. 1, *a* показана основная система смешанного метода для прямоугольного изгибающегося конечного элемента и нумерация основных неизвестных.

На рис. 1, *б* показано смещение этого конечного элемента как жесткого целого в принятой системе координат. Геометрия смещенного положения

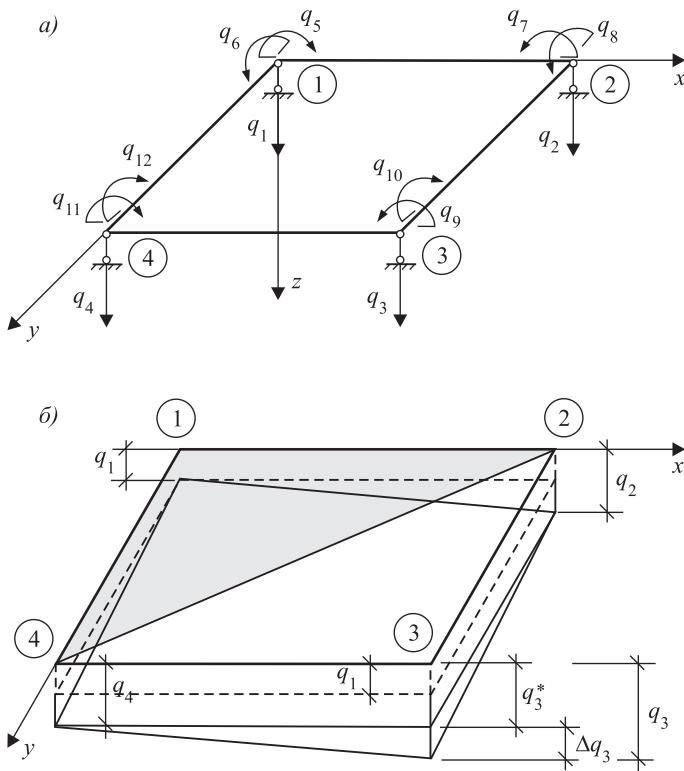


Рис. 1

определяется тремя степенями свободы конечного элемента как жесткого тела: перемещением q_1 и двумя углами поворота тела относительно осей OX и OY , или же тремя линейными перемещениями q_1, q_2, q_4 .

Напряженно-деформированное состояние конечного элемента с основной системой смешанного метода описывается уравнением

$$[d] \begin{Bmatrix} q \\ \tilde{q} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_p \\ \Delta_p \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где $[d] = \begin{bmatrix} r & \tilde{r} \\ \tilde{\delta} & \delta \end{bmatrix}$ – матрица откликов конечного элемента;

q и \tilde{q} – кинематические и силовые неизвестные в основной системе смешанного метода;

R_p и Δ_p – подвекторы откликов (реакции и перемещения соответственно) на воздействие нагрузки.

Перемещение q_3 узла 3 в основной системе представлено в виде суммы смещений КЭ как жесткого целого и дополнительного смещения, вызывающего изгиб конечного элемента:

$$q_3 = q_1 + \varphi_1^{(y)} a + \varphi_1^{(x)} b + \Delta q_3. \quad (2)$$

Отсюда следует, что

$$\begin{aligned} \Delta q_3 &= q_3 - (q_1 + \varphi_1^{(y)} a + \varphi_1^{(x)} b) = \\ &= q_3 - \left(q_1 + \frac{q_2 - q_1}{a} \cdot a + \frac{q_4 - q_1}{b} \cdot b \right) = (q_3 + q_1) - (q_2 + q_4). \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, в разрешающих уравнениях равновесия следует учесть, что реакции в кинематических связях во всех узлах 1, 2, 3, 4 конечного элемента от смещений q_1, q_2, q_4 и $(q_3 - \Delta q_3)$ равны нулю, а изгиб конечного элемента от смещения третьей связи на величину Δq_3 вызывает реакции во всех кинематических связях основной системы:

$$\begin{aligned} R_1^{(N)} &= (r_{13}\Delta q_3)^{(N)}, \quad R_2^{(N)} = (r_{23}\Delta q_3)^{(N)}, \\ R_3^{(N)} &= (r_{33}\Delta q_3)^{(N)}, \quad R_4^{(N)} = (r_{43}\Delta q_3)^{(N)}, \end{aligned}$$

где N – номера КЭ, сходящихся в узле I, J конечно-элементной сетки.

Блок $[r]$ и вектор кинематических неизвестных матрицы откликов конечного элемента принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} [r] &= \begin{bmatrix} r_{13} & -r_{23} & 0 & \\ 0 & r_{33} & & \\ & & -r_{43} & \end{bmatrix}, \\ \{q\} &= \begin{Bmatrix} \Delta q_3 \\ \Delta q_3 \\ \Delta q_3 \\ \Delta q_3 \end{Bmatrix}, \quad [r]^{(N)} \{q\}^{(N)} = \begin{Bmatrix} r_{13} & \Delta q_3 \\ -r_{23} & \Delta q_3 \\ r_{33} & \Delta q_3 \\ -r_{43} & \Delta q_3 \end{Bmatrix}^{(N)}. \end{aligned} \quad (4)$$

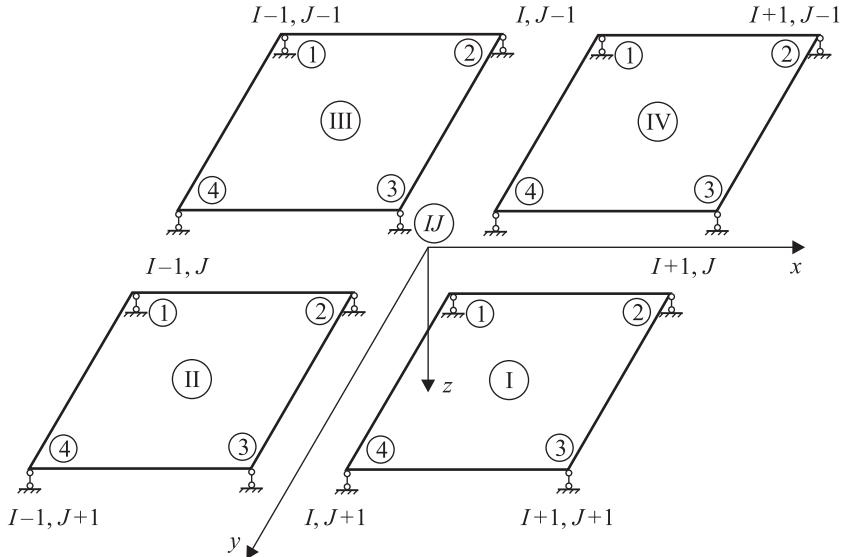


Рис. 2

На рис. 2 показаны конечные элементы, примыкающие к произвольному узлу I, J конечно-элементной сетки и номера кинематических неизвестных в узлах конечных элементов, относящихся к этому узлу.

Рассмотрим алгоритм исключения смещений конечного элемента как жесткого целого из системы разрешающих уравнений для пластиинки, составленных для узла I, J конечно-элементной сетки (рис. 3).

Эта система уравнений состоит из двух групп:

$$R_{IJ} = R_1^I + R_2^{II} + R_3^{III} + R_4^{IV} = 0 \text{ -- уравнения равновесия,} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{IJ}^{(y)} &= (\delta_5^I + \delta_7^{II}) + (\delta_9^{III} + \delta_{11}^{IV}) = 0, \text{ -- уравнения совместности деформаций} \\ \varphi_{IJ}^{(x)} &= (\delta_6^I + \delta_{12}^{II}) + (\delta_8^{III} + \delta_{10}^{IV}) = 0 \end{aligned}$$

КЭ, сходящихся в узле I, J .

Смещения КЭ как жесткого целого содержатся только в первых трех слагаемых уравнений равновесия, которые с учетом (4) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} R_{IJ} &= (r_{1,3}\Delta q_3)^I + (r_{2,3}\Delta q_3)^{II} + (r_{3,3}\Delta q_3)^{III} + \\ &+ (r_{4,3}\Delta q_3)^{IV} + \sum_{(N)} \left[\sum_{j=5}^{12} \tilde{r}_{ij} \tilde{q}_j + r_{i,p} \right]^{(N)} = 0, \quad (N=I, II, III, IV). \end{aligned} \quad (6)$$

Подставив в первые три слагаемых уравнения (6) для реакций выражения (3) для Δq_3 , получим

$$\sum_{(N)} [r_{13}(q_1 - q_2 + q_3 - q_4)]^{(N)} + \left[\sum_{j=5}^{12} \tilde{r}_{ij} \tilde{q}_j + r_{i,p} \right]^{(N)} = 0, \quad (N=I, II, III, IV). \quad (7)$$

Здесь все индексы при r и q связаны с локальной нумерацией (рис. 3, б).

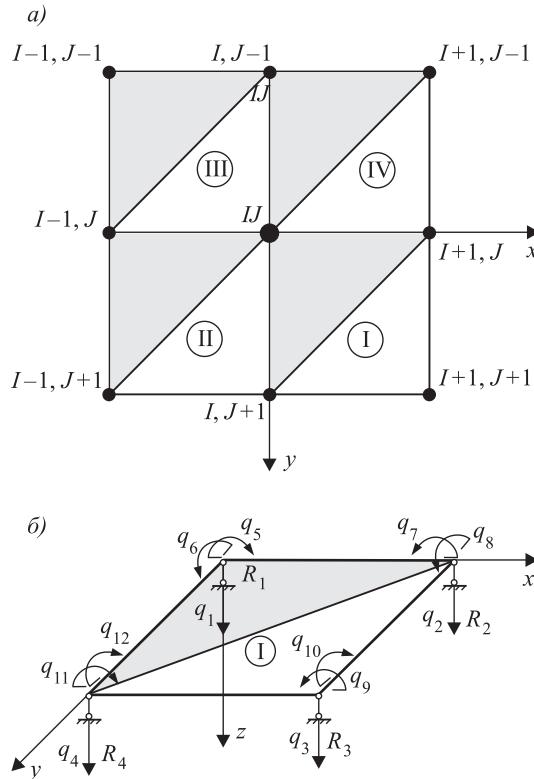


Рис. 3

Если учесть, что в узле I, J $q_1^I = q_2^I = q_3^I = q_4^I = q_{IJ}$, то первая сумма в (7) получает следующий вид:

$$\begin{aligned}
 & r_{13}^I (q_{I,J} - q_{I+1,J} + q_{I+1,J+1} - q_{I,J+1}) - r_{23}^I (q_{I-1,J} - q_{I,J} + q_{I,J+1} - q_{I-1,J+1}) + \\
 & + r_{33}^I (q_{I-1,J-1} - q_{I,J-1} + q_{I,J} - q_{I-1,J}) - r_{43}^I (q_{I,J-1} - q_{I+1,J-1} + q_{I+1,J} - q_{I,J}) = \\
 & = (r_{13}^I - r_{23}^I + r_{33}^I - r_{43}^I) q_{I,J} + (-r_{13}^I - r_{43}^I) q_{I+1,J} + (-r_{23}^I - r_{33}^I) q_{I-1,J} + \\
 & + r_{13}^I q_{I+1,J+1} - r_{23}^I q_{I-1,J+1} - r_{23}^I q_{I,J+1} + r_{43}^I q_{I+1,J-1}.
 \end{aligned} \quad (8)$$

Если все КЭ одинаковые, то верхние индексы (N) при r_{ij} можно убрать.

Для проверки корректности алгоритма исключения перемещений конечного элемента как жесткого целого выполнен расчет консольной пластиинки, изображенной на рис. 4, а. Параметры для расчета: сетка КЭ 4×4 , $P_{16} = P$, $P_{20} = P$, $h = 0,01$ м, $a = 1$ м, $E = 10920000$ Па, $\nu = 0,3$.

На рис. 4, а показана принятая в расчете глобальная нумерация узлов. На рис. 4, б показана локальная нумерация КЭ, сходящихся в узле 8, и кинематические связи в основной системе смешанного метода.

Так как при исключении перемещений КЭ как жесткого целого в его матрице откликов (1) трансформируется только блок $[r]$, то эта трансформация приводит к соответствующему изменению уравнений равновесия для каждого из узлов конечно-элементной сетки пластиинки (рис. 4, б). Для срав-

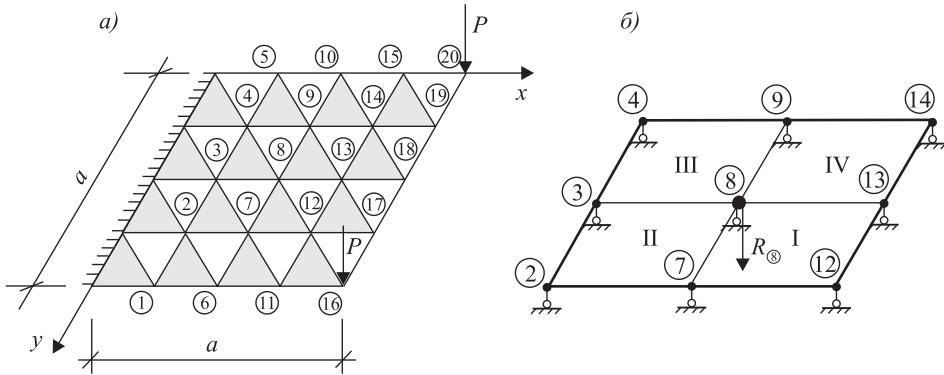


Рис. 4

нения ниже приведено непреобразованное уравнение равновесия (реакции) R_8 в узле 8 и преобразованное $R_8^{(n)}$ по предлагаемому алгоритму:

$$\begin{aligned} R_8 = & r(2,4)q_2 + (r(2,1)+r(3,4))q_3 + r(3,1)q_4 + (r(2,3)+r(1,4))q_7 + \\ & + (r(1,1)+r(2,2)+r(3,3)+r(4,4))q_8 + (r(3,2)+r(4,1))q_9 + \\ & + r(1,3)q_{12} + (r(1,2)+r(4,3))q_{13} + r(4,2)q_{14} + \sum_{j=5}^{12} \tilde{r}_{ij} \tilde{q}_j = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_8 = & -r(2,3)q_2 + (r(2,3)-r(3,3))q_3 + r(3,3)q_4 + (r(2,3)-r(1,3))q_7 + \\ & + (r(1,3)-r(2,3)+r(3,3)-r(4,3))q_8 + (r(4,3)-r(3,3))q_9 + r(1,3)q_{12} + \\ & + (r(4,3)-r(1,3))q_{13} - r(4,3)q_{14} + \sum_{j=5}^{12} \tilde{r}_{ij} \tilde{q}_j = 0. \end{aligned}$$

Исключение смещений конечного элемента как жесткого целого приводит к изменению блока $[r]$ в матрице откликов конечного элемента и в целом в блоке $[r]$ системы разрешающих уравнений. Матрица коэффициентов этого блока – преобразованная матрица жесткости $[r]$ становится неособенной, т.е. обратимой. Так как матрица коэффициентов блока $[\delta]$ также неособенная, то это позволяет свести систему уравнений смешанного метода к уравнениям:

$$\begin{aligned} 1) \quad & rq + \tilde{r} \tilde{q} + R_p = 0, \\ 2) \quad & \tilde{\delta} q + \delta \tilde{q} + \Delta_p = 0 \end{aligned} \tag{9}$$

или к системе уравнений метода перемещений, или к системе уравнений метода сил:

$$\begin{aligned} (r - \tilde{r} \delta^{-1} \tilde{\delta})q + (R_p - \tilde{r} \delta^{-1} \Delta_p) = 0 & \text{ – метод перемещений,} \\ (\delta - \tilde{\delta} r^{-1} \tilde{r})\tilde{q} + (\Delta_p - \tilde{\delta} r^{-1} R_p) = 0 & \text{ – метод сил.} \end{aligned}$$

Выполненные сравнительные расчеты по этим двум вариантам системы уравнений (9) показали полное совпадение результатов решения с использованием алгоритма исключения перемещений КЭ как жесткого целого и решения без исключения этих перемещений.

На рис. 5, 6 приведены эпюры прогибов в узлах сетки и эпюры изгибающих моментов M_x , M_y в различных сечениях.

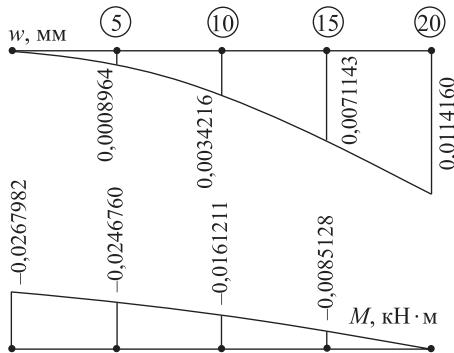


Рис. 5

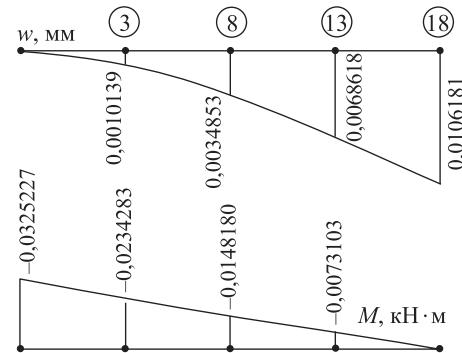


Рис. 6

Выводы. 1. Разработанный алгоритм исключения перемещений КЭ как жесткого целого позволяет устраниить вырожденность блока реакций $[r]$ – субматрицы жесткости в матрице откликов и избежать возникновения больших погрешностей счета при выполнении вычислительных операций.

2. Алгоритм может быть применен и для других типов конечных элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Игнатьев В.А., Игнатьев А.В., Жиделев А.В. Смешанная форма метода конечных элементов в задачах строительной механики. Волгоград: ВолгГАСУ, 2006.
2. Ignat'ev A.V., Ignat'ev V.A. Modified algorithm for the analysis of thin plates by the finite element method in the form of the classical mixed method // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. P. 1766–1770.
3. Голованов А.И., Тюленева О.Н., Шигабутдинов А.Ф. Метод конечных элементов в статике и динамике тонкостенных конструкций. М.: Физматлит, 2006. 391 с.
4. Гуреева Н.А., Клочков Ю.В., Николаев А.П. Учет смещения конечного элемента как жесткого целого в смешанной формулировке МКЭ // Стройт. механика инж. конструкций и сооружений. 2010. № 3. С. 47–53.
5. Дlugach M.I. Метод конечных элементов в применении к расчету цилиндрических оболочек с прямоугольными отверстиями // Прикл. механика. 1973. Т. 11. № 11. С. 35–41.
6. Железнов Л.П., Кабанов В.В. Функции перемещений конечных элементов оболочки вращения как твердых тел // Изв. АН СССР. МТТ. 1990. № 1. С. 131–136.
7. Кантин Г. Смещение криволинейных элементов как жесткого целого // Ракетная техника и космонавтика. 1970. № 7. С. 84–88.
8. Клочков Ю.В. Развитие теории линейного и нелинейного деформирования оболочек на основе МКЭ с учетом смещения как жесткого целого и изменения толщины: дис. ... д-ра техн. наук. Волгоград, 2001. 326 с.

Игнатьев Александр Владимирович, канд. техн. наук, доц.;
E-mail: alignat70@yandex.ru

Институт архитектуры и строительства Волгоградского государственного технического университета

Игнатьев Владимир Александрович, д-р техн. наук, проф.

Институт архитектуры и строительства Волгоградского государственного технического университета

Гамзатова Елена Александровна, асп.

Институт архитектуры и строительства Волгоградского государственного технического университета

Получено 14.02.18

Ignat'ev Alexander Vladimirovich, PhD, Ass. Professor; E-mail: alignat70@yandex.ru
Institute of Architecture and Civil Engineering of Volgograd State Technical University,
Russia

Ignat'ev Vladimir Alexandrovich, DSc, Professor
Institute of Architecture and Civil Engineering of Volgograd State Technical University,
Russia

Gamzatova Elena Alexandrovna, Post-graduate Student
Institute of Architecture and Civil Engineering of Volgograd State Technical University,
Russia

ANALYSIS OF THIN PLATES WITH EXCLUDING THE DISPLACEMENTS OF THE FINITE ELEMENT AS AN ABSOLUTELY RIGID BODY BY THE FEM IN THE FORM OF A CLASSICAL MIXED METHOD

The work is dedicated to the actual problem of excluding the displacements of the finite element as an absolutely rigid body in the FEM analysis. This problem is solved in an explicit form with the using of the finite element method developed by the authors in the form of a classical mixed method. In the case of the using finite elements in the form of beams (one-dimensional) or triangular plates (two-dimensional) the problem of accounting for the displacement of the finite element as an absolutely rigid body does not exist as for these finite elements a statically determinate basic system of the mixed method is used. With such a basic system the finite element rotates as an absolutely rigid body, without deforming, under the displacements of the bonds introduced into the basic system. In the finite element-rectangular plate, the displacement of the support in the basic system generates to its deformation. The decomposition of these FE displacements into two groups: finite element as an absolutely rigid body, which do not cause the appearance of reactions in the introduced support, and the bending displacements that cause of the finite element, makes it possible to construct an algorithm for excluding displacements of the finite element as a rigid integer from the governing system of equations. The correctness and effectiveness of such an algorithm is shown on the example of analysis of the rectangular plate.

К e y w o r d s: bended plate, excluding the displacements of the finite element as an absolutely rigid body, finite element method in the form of a classical mixed method.

REFERENCES

1. Ignat'ev V.A., Ignat'ev A.V., Zhidelyev A.V. Smeshannaya forma metoda konechnykh elementov v zadachakh stroitel'noy mekhaniki [A mixed form of the finite element method in problems of structural mechanics]. Volgograd, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, 2006. (in Russian)
2. Ignat'ev A.V., Ignat'ev V.A. Modified algorithm for the analysis of thin plates by the finite element method in the form of the classical mixed method. Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. Pp. 1766–1770.

3. Golovanov A.I., Tyuleneva O.N., Shigabutdinov A.F. Metod konechnykh elementov v statike i dinamike tonkostennnykh konstruktsiy [Finite element method in statics and dynamics of thin-walled structures]. Moscow, Fizmatlit, 2006. 391 p. (in Russian)
 4. Gureeva N.A., Klochkov Yu.V., Nikolaev A.P. Uchet smeshcheniya konechnogo elementa kak zhestkogo tselogo v smeshannoy formulirovke MKE [The bias of the finite element as a rigid whole in a mixed formulation FEM]. Stroitel'naya mehanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy [Structural mechanics of engineering constructions and buildings]. 2010. No. 3. Pp. 47–53. (in Russian)
 5. Dlugach M.I. Metod konechnykh elementov v primenenii k raschetu tsilindricheskikh obolochek s pryamougol'nymi otverstiyami [Finite element method as applied to the analyses of cylindrical shells with rectangular holes]. Prikladnaya mehanika [Applied Mechanics]. 1973. Vol. 11. No. 11. Pp. 35–41. (in Russian)
 6. Zheleznov L.P., Kabanov V.V. Funktsii peremeshcheniy konechnykh elementov obolochki vrashcheniya kak tverdykh tel [Functions of the displacements of the finite elements of the shell rotation as solids]. Izvestiya AN SSSR. MTT [Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Solid mechanics]. 1990. No. 1. Pp. 131–136. (in Russian)
 7. Cantin G. Smeshchenie krivolineynykh elementov kak zhestkogo tselogo [Deflection curved elements as the rigid whole]. Raketnaya tekhnika i kosmonavtika [Rocketry and astronautics]. 1970. No. 7. Pp. 84–88. (in Russian)
 8. Klochkov Yu.V. Razvitiye teorii lineynogo i nelineynogo deformirovaniya obolochek na osnove MKE s uchetom smeshcheniya kak zhestkogo tselogo i izmeneniya tolshchiny: dis. ... d-ra tekhn. nauk [Development of the theory of linear and nonlinear deformation of shells on the basis of FEM with allowance for the displacement as a rigid whole and thickness variation: author. diss. ... DSc]. Volgograd, 2001. 326 p. (in Russian)
-

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ



УДК 624.042.7

П.Д. БАЛАКИН, Л.В. КРАСОТИНА, П.А. КОРЧАГИН

ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ АРОЧНЫХ СВОДОВ ИЗ ПРОФИЛИРОВАННОГО НАСТИЛА

В соответствии с изменившимися нормами проектирования строительных конструкций для определения нормативного значения пульсационной составляющей ветровой нагрузки необходимо знать частоты собственных колебаний конструкций. Определение частот и форм собственных колебаний арочных сводов из профилированного арочного самонесущего настила с учетом всех конструктивных особенностей представляет собой достаточно сложную задачу. В настоящей работе представлен вариант определения частот собственных колебаний посредством математического моделирования, в том числе и на основе контактной краевой задачи конструкционного типа, выявлено влияние варианта созданной конечно-элементной модели и степени ее детализации на частоту собственных колебаний проектируемого арочного свода.

Ключевые слова: свод, частота собственных колебаний, метод конечных элементов, конечно-элементные модели, серединные поверхности, пластина, граничные условия, частоты и формы колебаний.

Введение. Как известно, любая реальная конструктивная система является колебательной и ее устойчивость в условиях переменного внешнего нагружения может быть оценена по критерию сравнения доминирующих частот внешних сил и собственных частот колебаний системы [1].

Современные техногенные системы сложны, состоят из множества податливых элементов и системы связей, колебательные контуры системы взаимодействуют и их совокупность порождает различные частоты и формы собственных колебаний, теоретическое определение которых представляет собой сложную динамическую задачу.

В практике конструкторских организаций машиностроительных производств достаточно хорошо отработаны методики определения собственных частот типовых деталей и элементов конструкций, испытывающих высокочастотное внешнее силовое возбуждение [2].

Ранее в строительной отрасли при проектировании зданий и сооружений определять частоты их собственных колебаний требовалось только в ряде оговоренных нормами случаев. Это связано с тем, что экспериментальные

и теоретические основы о взаимодействии зданий и сооружений с пульсационной ветровой нагрузкой разрабатывались еще в конце 1950-х – начале 1960-х гг. и с тех пор практически не изменялись. Такие расчеты трудоемки, требуют большого объема вычислений, а возможности ЭВМ в указанный период времени не позволяли в полном объеме реализовывать разрабатываемые расчетные методики [3].

До недавнего времени при расчете многоэтажных зданий высотой до 40 м и одноэтажных производственных высотой до 36 м при отношении высоты к пролету менее 1,5, расположенных на открытых территориях и территориях с препятствиями высотой более 10 м, в соответствии с [4], пульсационную составляющую ветровой нагрузки и, следовательно, частоты собственных колебаний конструкций допускалось не учитывать. Такие допущения были связаны с тем, что собственные частоты зданий, построенных из традиционных материалов, существенно превышали частоты внешнего нагружения ветрового происхождения [5], что сводило к минимуму риск возникновения резонанса.

В настоящее время в соответствии с изменившимися нормами проектирования строительных конструкций изменился подход к учету ветровых нагрузок, действующих на здания и сооружения. Теперь расчеты всех зданий и сооружений необходимо проводить с учетом динамических воздействий, вызывающих в них переменные во времени напряжения, деформации и перемещения [6]. Задачи таких расчетов включают определение частот собственных колебаний проектируемых объектов с целью исключения явления резонанса, а также определение максимальных напряжений в элементах конструкций, возникающих в процессе колебаний, и сравнение этих величин с предельно допустимыми значениями, определенными из условий прочности и жесткости [7].

В строительной отрасли находят широкое применение конструкции в виде арочных сводов, выполненных цилиндрических тонкостенных профилированных заготовок, которые используются в качестве покрытий зданий и сооружений [8]. Такие арочные своды обладают невысокой жесткостью, и частота собственных колебаний этих конструкций может быть близка частоте пульсаций ветровой нагрузки, включая вихревое и аэродинамическое возбуждение типа галопирования или флаттера. Силовое возбуждение также может иметь сейсмическую или техногенную природу, поэтому проекты подобных строительных конструкций должны проходить проверку по критерию динамической устойчивости.

Постановка задачи. В качестве объекта исследования выбран арочный свод, изготовленный из стальных гнутых профилей с трапециевидными гофрами [9]. Такие конструкции в последнее время находят широкое применение. Примеры рассматриваемых в работе конструкций приведены на рис. 1.

Конструктивной особенностью арочных сводов из профилированного настила (рис. 2) является наличие поперечных стыков. Технологически возможная ширина профилированных арочных заготовок варьируется от 500 до 900 мм в зависимости от высоты (типа) профиля. За счет наличия поперечных стыков в арочных сводах появляются периодические участки с двойной

толщиной верхних несущих полок профиля. Это приводит к увеличению жесткости оболочки (рис. 2, б), что необходимо учитывать при расчетах этих конструкций, в том числе и динамических.



*Рис. 1. Примеры использования арочного свода для покрытия
а – здания культурного назначения; б – профилированные заготовки
для арочного свода, используемые при реконструкции жилого дома*

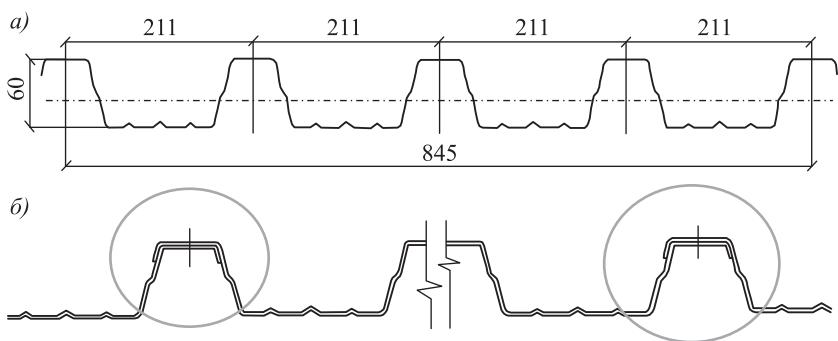


Рис. 2. Профиль АН60

*а – поперечное сечение одной заготовки; б – выделены места соединения заготовок
(удвоение толщины профиля, наличие соединительных элементов)*

Теория. Известные аналитические методы определения частот собственных колебаний механических систем, например, способы Рэлея, Граммеля, формулы Донкерлия, подходы Ритца, Бубнова – Галеркина и др. [10] труднореализуемы для обозначенного нами объекта.

В соответствии с современными нормами проектирования [6] нормативное значение пульсационной составляющей основной ветровой нагрузки w_p на эквивалентной высоте z_e необходимо определять следующим образом:

а) для сооружений и их конструктивных элементов, у которых первая частота собственных колебаний f_1 , Гц, больше предельного значения собственной частоты f_{\lim} :

$$w_p = w_m \cdot \xi(z_e) \cdot v, \quad (1)$$

где w_m – среднее значение составляющей основной ветровой нагрузки;

v – коэффициент пространственной корреляции пульсаций ветра;

$\xi(z_e)$ – коэффициент пульсации давления ветра;

б) для всех сооружений (и их конструктивных элементов), у которых $f_1 < f_{\lim} < f_2$ нормативное значение пульсационной составляющей основной ветровой нагрузки w_p необходимо определять по СП [6]:

$$w_p = w_m \cdot \xi \zeta(z_e) \cdot v, \quad (2)$$

где f_2 – вторая собственная частота;

ξ – коэффициент динамичности, определяемый в зависимости от логарифмического декремента колебаний δ и параметра для первой собственной частоты f_1 :

$$\xi_1 = \frac{\sqrt{w_0 \cdot k(z_{\text{эк}}) \cdot \gamma_f}}{940f_1}, \quad (3)$$

где w_0 , Па – нормативное значение давления ветра;

$k(z_{\text{эк}})$ – коэффициент, учитывающий изменение давления ветра для высоты $z_{\text{эк}}$;

γ_f – коэффициент надежности по нагрузке.

Таким образом, для корректного проектирования арочных сводов необходимо знать как минимум две первые частоты собственных колебаний. В нормативной документации способ определения собственных частот не регламентирован.

В последнее время учеными предпринимаются попытки совершенствования теории определения частот собственных колебаний различных конструктивных систем, в том числе с использованием конечно-элементных моделей (КЭ-моделей) [11]. Но тем не менее в настоящее время универсального метода решения поставленной задачи не существует.

С учетом того что рассматриваемые в работе арочные своды имеют поперечную гофрировку профиля (являются геометрически ортотропными), имеют регулярные технологическиестыки (технологически ортотропны), теоретическое определение частот собственных колебаний не представляется возможным. В работе частоты и формы собственных колебаний арочных сводов были определены с помощью МКЭ. КЭ-модели дают возможность

учесть все вышеуказанные конструктивные особенности рассматриваемых конструкций [12]. Учитывая большое количество входных параметров, длительный и достаточно сложный процесс моделирования арочных сводов, значительное время расчета КЭМ, возникла необходимость решения вопроса о требуемой степени детализации КЭ-модели. Для получения корректных результатов определения частот и форм собственных колебаний арочных сводов из профилированных заготовок потребовалось исследовать:

- какую часть свода необходимо моделировать (из какого количества профилированных заготовок), чтобы исключить влияние краевого эффекта на результаты определения частот собственных колебаний;
- следует ли моделировать поперечныестыки (рис. 2) с учетом трения в них, возможного проскальзывания и наличия соединительных элементов;
- необходимо ли моделировать резиновые прокладки под соединительные элементы в поперечных стыках.

Для решения поставленной задачи был проведен численный эксперимент. Создан ряд геометрических и дискретных моделей различных вариантов арочных сводов [9], состоящих из одной, двух, четырех, десяти заготовок с учетом поперечных стыков, рассмотрен вариант свода из четырех заготовок с резиновыми вкладышами в поперечном стыке в местах закрепления соединительными элементами, а также свод из десяти заготовок без учета стыков («монолитный»). Для анализа полученных результатов определения частот и форм собственных колебаний все КЭ-модели сводов были выполнены с одинаковыми пролетом, стрелой подъема, толщиной и типом профиля.

Пример КЭ-модели арочных сводов из двух заготовок из профиля АН60 [9] приведен на рис. 3.

Данные по внешнему воздействию, граничные условия, визуализация и обработка результатов анализа проводились с использованием PRE/POST processor FEMAP. Для определения собственных частот и форм колебаний использован универсальный блок программного комплекса «NX NASTRAN»-NormalModes.

Особое внимание при создании КЭМ было обращено на контактирующие поверхности поперечного стыка (рис. 3, б, фрагмент 1). Они не имеют граничных условий кинематического закрепления. В стыке связь между заготовками установлена в точках закрепления соединительными элементами и с помощью контактных связей. Особенностью созданных КЭМ являлось моделирование условий контактного сопряжения заготовок оболочек и учет изменения этих условий при динамической нагрузке. Для данной краевой контактной задачи характерно наличие зон контакта переменной конфигурации [12]. При определении собственных частот арочных сводов учитывалось, что координаты узлов КЭ контактирующих поверхностей верхней заготовки должны быть всегда больше координат нижней, что физически обозначает исключение взаимопроникновения поверхностей контактирующих арочных заготовок.

При создании КЭМ использовался метод формирования возможных зон контакта типа «поверхность – поверхность» с помощью регионов контакта при следующих условиях их моделирования: трение между заготовками моделируется в соответствии с законом трения Кулона в классической фор-

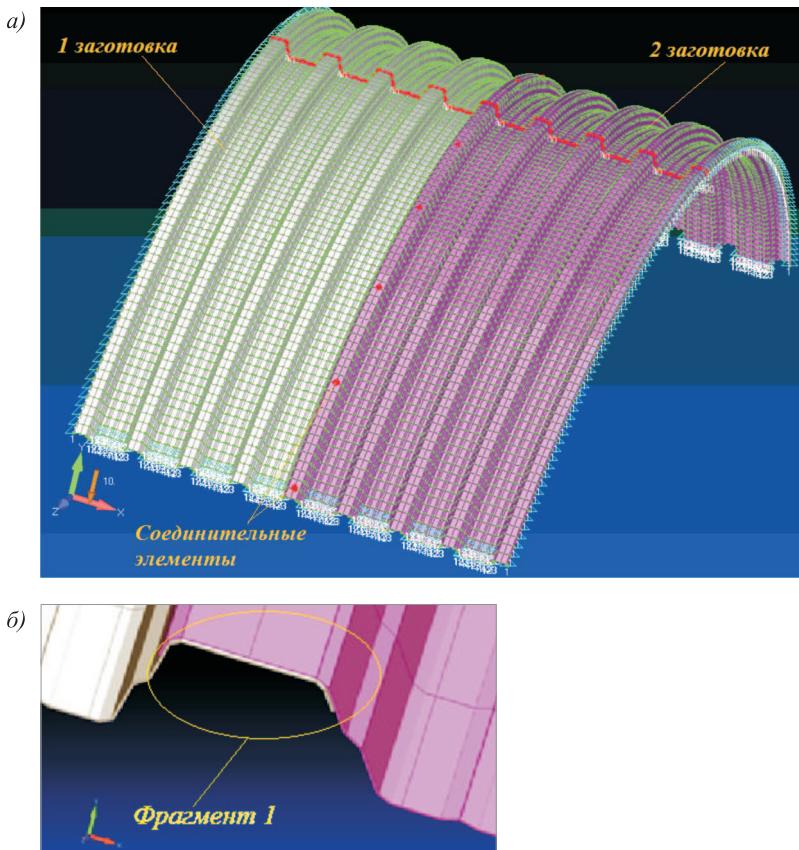


Рис. 3. КЭМ арочных сводов из двух заготовок, стыкуемых внахлест (а). Профиль АН60 толщиной 1 мм. Изометрия б – фрагмент стыка заготовок внахлест

мулировке; материал изотропен и подчиняется закону Гука; деформации и углы поворота малы; моделируется сцепление и проскальзывание заготовок. Принятые допущения корректны для решения задач подобного уровня.

Обсуждение результатов. В результате расчетов определены собственные частоты и формы колебаний с учетом диссипации энергии (комплексный метод Ланцоша), в том числе и для варианта КЭ-модели с резиновыми вкладышами. Результаты вычислений сведены в таблицу. Формы колебаний представлены на рис. 4.

Результаты определения частот собственных колебаний арочного свода

Состав оболочки	Частота собственных колебаний, Гц				
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
1. Одна заготовка	13,38	29,53	31,56	38,62	53,67
2. Две заготовки с учетом контакта	13,52	23,12	29,83	31,93	38,66
3. Четыре заготовки с учетом контакта	13,59	23,41	25,24	26,90	30,91
4. «Монолит» 10 заготовок	13,74	23,84	52,78	87,22	–
5. Четыре заготовки с учетом контакта и резиновыми прокладками	12,93	22,15	24,48	25,3	–

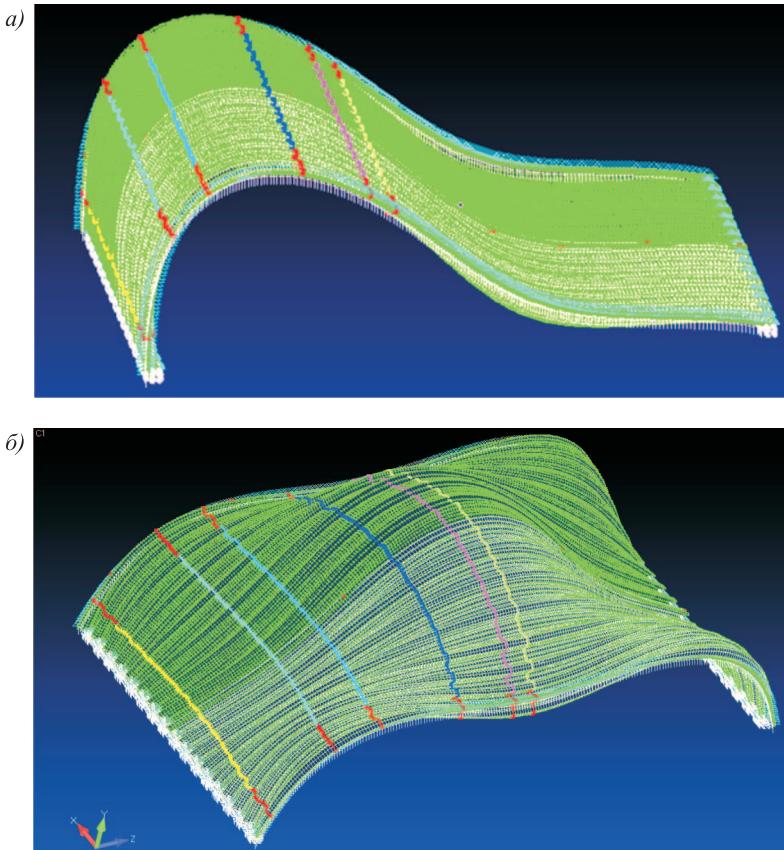


Рис. 4. Первая форма собственных колебаний (продольные) (а); вторая форма собственных колебаний (поперечные) (б)

На рис. 4, а приведена первая форма собственных колебаний сборного арочного свода из четырех профилированных заготовок; частота колебаний $f_1 = 13,59$ Гц. На рис. 4, б – вторая форма собственных колебаний сборного арочного свода из четырех профилированных заготовок, частота колебаний $f_1 = 23,41$ Гц.

Заключение. 1. Расчеты вариантов КЭ-моделей арочного свода из одного или нескольких листов профилированного настила с учетом контактирующих поверхностей и варианта без учета стыков («монолитная» модель) дают расхождение в определении частоты первой формы собственных колебаний (продольных) до 6 %.

2. Близкие значения второй частоты собственных колебаний (поперечных) арочного свода дает расчет КЭ-моделей из двух, четырех заготовок с учетом поперечных стыков и «монолитный» вариант. Расхождение составляет не более 4 %.

3. При моделировании арочного свода из профилированного настила из нескольких листов с учетом контактирующих поверхностей, наличия резиновых вкладышей под соединительные элементы и вариант свода без учета стыков дает расхождение в определении частот собственных колебаний второй формы (поперечных) до 6 %.

4. Для корректного определения двух первых форм собственных колебаний арочных сводов из профилированного настила возможно использовать упрощенные КЭ-модели, без моделирования поперечных стыков и всех конструктивных особенностей, связанных с ними. Расхождение в определении двух первых частот собственных колебаний в этом случае будет менее 10 %, что достаточно для инженерных расчетов.

5. Значения и частоты собственных колебаний рассматриваемых в работе арочных сводов по первой форме могут быть близки как к силовому возбуждению техногенного происхождения от размещенного внутри объекта оборудования, так и от наводимого от внешних источников, например, от транспортных систем.

6. Кратное отличие значений собственных частот по первой и второй формам свидетельствует о корректности моделирования колебательного процесса сложного объекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агаханов Г.Э. Решение задач механики деформируемого твердого тела с использованием фиктивных расчетных схем // Вестн. Дагестан. гос. техн. ун-та. Техн. науки. 2015. Т. 38. № 3. С. 8–15.
2. Белокобыльский С.В., Елисеев С.В., Ситов И.С. Динамика механических систем // Рычажные и инерционно-упругие связи. СПб.: Политехника, 2015. 319 с.
3. Попов Н.А. Рекомендации по уточненному динамическому расчету зданий и сооружений на действие пульсационной составляющей ветровой нагрузки. М.: Госстрой России, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2000. 45 с.
4. СНиП 2.01.07–85*. Нагрузки и воздействия. 2016. 80 с.
5. Березин М.А., Катюшин В.В. Атлас аэродинамических характеристик строительных конструкций. Новосибирск: Олден-Полиграфия, 2003. 130 с.
6. СП 20.13330.2016. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85*. Нагрузки и воздействия. 2016. 80 с.
7. Qu Y., Long X., Wu S., Meng G. A unified formulation for vibration analysis of composite laminated shells of revolution including shear deformation and rotary inertia // Composite structures. 2013. No. 98. P. 169–191.
8. Красотина Л.В., Краснощеков Ю.В., Мосенкин Ю.М. Использование арочного профнастила при реконструкции зданий // Вестн. СибАДИ. 2009. № 4 (14). С. 41–45.
9. ТУ 112-235-39124899–2005. Профили стальные гнутые арочные с трапециевидными гофрами /СибНИИстрой. Новосибирск, 2005. 18 с.
10. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наука, 1975. С. 400.
11. Tovstik P.E., Tovstik T.P. On the 2D models of plates and shells including the shear // ZAMM. 2007. Vol. 87. No. 2. P. 160–171.
12. Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде MSC visual NASTRAN for Windows. М.: ДМК Пресс, 2004. С. 552.

Балакин Павел Дмитриевич, д-р техн. наук, проф.

Омский государственный технический университет

Красотина Лариса Владимировна, канд. техн. наук, доц.

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск

Корчагин Павел Александрович, д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск

Получено после доработки 08.02.18

Balakin Pavel Dmitrievich, DSc, Professor

Omsk State Technical University, Russia

Krasotina Larisa Vladimirovna, PhD, Ass. Professor

Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

Korchagin Pavel Alexandrovich, DSc, Professor

Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

FREQUENCIES OF OWN VIBRATIONS OF ARCTIC CONSISTS FROM THE PROFILED FLOOD

In accordance with the changed norms for the design of building structures to determine the normative value of the pulsating component of the wind load, it is necessary to know the frequencies of the natural vibrations of the structures. The determination of the frequencies and forms of natural oscillations of arch arches from profiled arched self-supporting flooring, taking into account all the design features, is a rather complicated task. In this paper we present a variant of determining the frequencies of natural oscillations by means of mathematical modeling, including on the basis of a contact boundary value problem of structural type. In this paper, the effect of the variant of the created finite element model and the degree of its detailing on the frequency of natural oscillations of the projected arch vault is revealed.

К e w o r d s: vault, frequency of natural oscillations, finite element method, finite element models, middle surfaces, plate, border conditions, frequency and shape of oscillations.

REFERENCES

1. A g a k h a n o v G.E. Reshenie zadach mekhaniki deformiruemogo tverdogo tela s ispol'zovaniem fiktivnykh raschetnykh skhem [Solving the problems of the mechanics of a deformed solid using fictitious design schemes]. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science]. 2015. Vol. 38. No. 3. Pp. 8–15. (in Russian)
2. B e l o k o b y l ' s k i y S.V., E l i s e e v S.V., S i t o v I.S. Dinamika mekhanicheskikh system [Dynamics of mechanical systems]. Rychazhnye i inertsionno-uprugie svyazi [Lever and inertial-elastic bonds]. Saint-Petersburg, Politechnica, 2015. 319 p. (in Russian)
3. P o p o v N.A. Rekomendatsii po utochnennomu dinamicheskому raschetu zdaniy i sooruzheniy na deystvie pul'satsionnoy sostavlyayushchey vetrovoy nagruzki [Recommendations for refined dynamic calculation of buildings and structures for the action of the pulsating component of the wind load]. Moscow, Gosstroy of Russia, TsNIISK them. V.A. Kucherenko, 2000. 45 p. (in Russian)
4. S N i P 2.01.07–85 *. Nagruzki i vozdeystviya [Loads and effects]. 2016. 80 p. (in Russian)
5. B e r e z i n M.A., K a t y u s h i n V.V. Atlas aerodinamicheskikh kharakteristik stroitel'nykh konstruktsiy [Atlas of aerodynamic characteristics of building structures]. Novosibirsk, Alden-Polygraphy, 2003. 130 p. (in Russian)
6. S P 20.13330.2016. Aktualizirovannaya redaktsiya S N i P 2.01.07–85*. Nagruzki i vozdeystviya [Updated version of S N i P 2.01.07–85*. Loads and impacts]. 2016. 80 p. (in Russian)

7. Qu Y., Long X., Wu S., Meng G. A unified formulation for vibration analysis of composite laminated shells of revolution including shear deformation and rotary inertia. *Composite structures.* 2013. No. 98. Pp. 169–191.
 8. Krasotina L.V., Krasnoshchekov Yu.V., Mosenkis Yu.M. Ispol'zovanie arochnogo profnastila pri rekonstruktsii zdaniy [Use of arched corrugated board during the reconstruction of buildings]. *Vestnik SibADI* [Bulletin of SibADI]. 2009. No. 4 (14). Pp. 41–45. (in Russian)
 9. TU 112-235-39124899-2005. Profili stal'nye gnutye arochnye s trapetsievidnymi gofрами [The profiles are steel curved arched with trapezoidal corrugations]. SibNIIstroy. Novosibirsk, 2005. 18 p. (in Russian)
 10. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Handbook on the resistance of materials]. Kiev, Science, 1975. P. 400. (in Russian)
 11. Tovstik P.E., Tovstik T.P. On the 2D models of plates and shells including the shear. *ZAMM.* 2007. Vol. 87. No. 2. Pp. 160–171.
 12. Rychkov S.P. *Modelirovaniye konstruktseii v srede MSC visual NASTRAN for Windows* [Modeling of structures in the MSC visual environment NASTRAN for Windows]. Moscow, DMK Press, 2004. P. 552. (in Russian)
-

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ



УДК 691.327:539.32

И.Н. МАКСИМОВА, В.Т. ЕРОФЕЕВ, Н.И. МАКРИДИН

КИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГИДРАТАЦИОННОГО СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И ТВЕРДЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ В ВОЗРАСТЕ ДО 9,5 ЛЕТ ПОСЛЕ ПРОПАРКИ

Приведены экспериментально полученные данные по изучению влияния количественной дозировки и процедуры дозирования суперпластификатора С-3 на характер изменения параметров конструкционной прочности цементного камня во временном диапазоне от 28 сут до 9,5 лет. Получены математические модели изменения предела прочности на осевое сжатие, предела прочности на растяжение при изгибе, критического коэффициента интенсивности напряжения и энергии акустической эмиссии. Произведена сравнительная оценка названных параметров, полученных в результате физического эксперимента и на основе феноменологических моделей. Показано, что модификация структуры цементного камня суперпластификатором приводит не только к заметному изменению численных значений параметров конструкционной прочности, но и к более заметному колебанию отклонений рассматриваемых параметров, найденных экспериментально и по аналитической формуле, в контрольные сроки испытаний. При этом относительно параметра прочности на осевое сжатие параметры $R_{p.i}$, K_{1c} и $\Theta_{a,3}$ по колебанию численных отклонений являются более структурно-чувствительными параметрами.

Ключевые слова: цементный камень, суперпластификатор С-3, процедура приготовления цементного теста, структурообразование, твердение, прочность, коэффициент интенсивности напряжения, акустическая эмиссия, параметры конструкционной прочности.

Как известно, изучение процессов структурообразования и твердения цементного камня и бетона на его основе и новых методик оценки свойств их структуры и механического поведения под нагрузкой является основной предпосылкой эффективной программы оценки свойств материалов и дальнейшего улучшения понимания этих свойств. Многочисленными исследованиями показано, что цементный камень или клей, являясь матричным компонентом структуры конструкционного бетона, предопределяет его механическое поведение как при силовом, так и несиловом воздействии.

В работах [1–7] отмечается, что фактор времени вызывает в бетоне проявление двух характерных разнонаправленных процессов: процесса нарастания

© Максимова И.Н., Ерофеев В.Т., Макридин Н.И., 2018

ния прочности во времени (процесс старения бетона), определяемого физико-химическими изменениями его структуры, и процесса снижения прочности находящегося в напряженном состоянии бетона, связанного с проявлением его реологических свойств, – ростом деформации во времени, приводящим к определенным нарушениям внутренних связей в материале на микроД- и макроуровнях.

Проблема нарастания длительной прочности цементной дисперсной системы во времени по своей практической значимости остается в центре внимания как отечественных, так и зарубежных исследователей [8–13]. В современных условиях поиска путей получения и использования в строительной практике модифицированных бетонов нового поколения (БНП) с очень высокими показателями прочности, однородности и низкой пористости проблема длительной конструкционной прочности БНП приобретает особый научный и практический интерес как с позиций выбора технологической оптимизации структуры, так и прогнозирования параметров конструкционной прочности во времени.

К сожалению, экспериментальных исследований по изучению деформационных особенностей БНП как с позиций механики деформируемого твердого тела, так и с позиций структурной механики разрушения материалов в отечественной литературе весьма мало, что сдерживает развитие современной науки о бетоне, позволяющей описывать процессы трещинообразования и разрушения материалов, а также рассчитывать их гарантированный срок эксплуатации под нагрузкой [14].

Целью данной работы являлось экспериментальное получение важнейших параметров конструкционной прочности модифицированной суперпластификатором дисперсно-кристаллитной структуры цементного камня с позиций структурной механики разрушения материалов в широком временном интервале, получение общего математического определяющего уравнения описания процессов структурообразования и твердения цементного камня сравниваемых серий образцов через параметры его конструкционной прочности, оценка соответствия полученной математической модели результатам макроскопического эксперимента и возможности использования полученной модели в качестве феноменологической.

Для изготовления опытных образцов сравниваемых серий цементного камня при исследовании влияния добавки суперпластификатора на процессы структурообразования и твердения и параметры его механического поведения при неравновесных механических испытаниях образцов по ГОСТ 29167–91 был использован бездобавочный сульфатостойкий портландцемент марки 400 Вольского завода с нормальной густотой 24 %. Было изготовлено четыре серии образцов типа I размером 4×4×16 см с В/Ц = 0,24, наиболее характерных по процедуре введения и расходу суперпластификатора. На каждый срок испытания было изготовлено по три образца каждой серии. Контрольная серия образцов 1 была приготовлена без суперпластификатора С-3, образцы серии 2 – с дозировкой суперпластификатора (СП) в количестве 1 % от массы цемента, суперпластификатор вводили с водой затворения. Образцы серии 3 были приготовлены с двухстадийным введением воды затворения, при этом суперпластификатор в количестве 0,5 % от массы цемента вводили с первой

и второй частью воды затворения поровну. Образцы серии 4 приготавливали также при двухстадийном введении воды затворения, весь объем суперпластификатора в количестве 0,5 % от массы цемента вводили со второй частью воды затворения.

Формование образцов осуществляли на лабораторной виброплощадке со стандартными параметрами вибрации в течение 3–5 с. Отформованные образцы размещали в гидравлической ванне и выдерживали в течение 17 ч, а затем подвергали тепловлажностной обработке в лабораторной пропарочной камере по режиму: подъем температуры – 2 ч.; изотермическая выдержка – 8 ч при 85–90 °C; естественное остывание образцов в пропарочной камере. Далее образцы находились в естественных лабораторных условиях, где в зависимости от сезона температура и относительная влажность изменялись в диапазоне 8–24 °C и 56–90 % соответственно.

Кинетику изменения параметров конструкционной прочности цементного камня на образцах серий 1–4 наблюдали в течение 9,5 лет. Следует отметить, что оценку контролируемых параметров во все сроки испытания производили в лаборатории при температуре (20±2) °C и относительной влажности 58–60 % и находили как среднюю величину из испытания трех образцов-близнецов.

В табл. 1 приведены численные значения параметров качества конструкционной прочности цементного камня: прочность на сжатие $R_{сж}$, прочность на растяжение при изгибе $R_{p.i}$, критический коэффициент интенсивности напряжения K_{lc} , удельная энергия акустической эмиссии $\mathcal{E}_{a.3}$, полученные в диапазоне наблюдения от 28 сут до 9,5 лет.

Математическая обработка полученных в наших опытах экспериментальных данных (табл. 1) с использованием программно-компьютерных математических методов позволила получить математическое описание про-

Таблица 1. Экспериментальные силовые и энергетические (акустические) параметры разрушения конструкционной прочности цементного камня

Параметр конструкционной прочности цементного камня	Показатели параметров образцов сравниваемых серий цементного камня в возрасте			
	28 сут	420 сут	4,5 года	9,5 лет
1	2	3	4	5
<i>Серия 1</i>				
$R_{сж}$, МПа	76,7	87,5	96,9	100,3
$R_{p.i}$, МПа	5,19	6,38	6,97	6,77
K_{lc} , МПа · м ^{0,5}	0,51	0,63	0,70	0,66
$\mathcal{E}_{a.3}$, В ² · см ⁻²	0,170	0,210	0,427	0,607
<i>Серия 2</i>				
$R_{сж}$, МПа	68,2	74,5	70,6	84,2
$R_{p.i}$, МПа	3,88	6,69	6,37	7,35
K_{lc} , МПа · м ^{0,5}	0,38	0,66	0,63	0,70
$\mathcal{E}_{a.3}$, В ² · см ⁻²	0,108	0,270	0,308	0,333

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
<i>Серия 3</i>				
$R_{сж}$, МПа	94,1	103,2	96,1	94,3
$R_{р.и}$, МПа	3,98	6,90	6,71	6,55
K_{1c} , МПа · м ^{0,5}	0,39	0,68	0,66	0,64
$\mathcal{E}_{a.3}$, В ² · см ⁻²	0,102	0,136	0,267	0,355
<i>Серия 4</i>				
$R_{сж}$, МПа	100,4	108,0	101,8	95,0
$R_{р.и}$, МПа	4,00	7,46	7,20	6,98
K_{1c} , МПа · м ^{0,5}	0,39	0,73	0,71	0,70
$\mathcal{E}_{a.3}$, В ² · см ⁻²	0,117	0,255	0,416	0,634

цессов структурообразования и твердения параметров конструкционной прочности цементного камня сравниваемых серий образцов, представленное в табл. 2. Получено общее уравнение

$$R_{сж} = \frac{a + bt}{1 + ct + dt^2},$$

где a, b, c, d – эмпирические коэффициенты;

t – продолжительность наблюдения структурообразования и твердения образцов цементного камня, сут.

Анализ численных значений параметров конструкционной прочности сравниваемых серий опытных образцов и характера изменения этих параметров в рассматриваемом диапазоне возраста цементного камня, приведенных в табл. 2, как по экспериментальным данным, так и по математическим зависимостям описания процесса структурообразования и твердения позволяет, прежде всего, отметить, что модифицирование структуры цементного камня суперпластификатором приводит не только к заметному изменению численных значений параметров конструкционной прочности, но и к более заметному колебанию отклонений рассматриваемых параметров, найденных экспериментально и по аналитической формуле. При этом относительно прочности на осевое сжатие параметры $R_{р.и}$, K_{1c} и $\mathcal{E}_{a.3}$ по колебанию численных отклонений являются более структурно-чувствительными параметрами.

Так, для образцов цементного камня в возрасте до 9,5 лет контрольные образцы серии 1 показывали превышение (+) и уменьшение (-) для численных значений параметра $R_{сж}$, полученных по формуле, относительно эксперимента в пределах от +2,2 до -0,3 %; а для образцов серий 2, 3 и 4 – от +6,8 до -4,5 %; от +2,6 до -1,4 % и от +0,6 до -0,3 % соответственно.

Для параметра $R_{р.и}$ образцы контрольной серии 1 показали отклонение от +2,5 до -4,0 %, а образцы серий 2, 3 и 4 – от +15,9 до -5,0 %; от +14,1 до -0,0 % и от +0,3 до -4,7 % соответственно.

Для параметра K_{1c} образцы контрольной серии 1 показали отклонение от +3,8 до -4,9 %, а образцы серий 2, 3 и 4 – от +11,8 до -3,8 %; от +3,3 до -0,7 % и от +3,5 до -1,5 % соответственно.

2 Таблица 2. Значения эмпирических коэффициентов корреляции и уравнений регрессии параметров конструкционной прочности цементного камня в возрасте от 28 сут до 9,5 лет

№ серии	Параметр конструкционной прочности цементного камня	Вид функции	a	Значения коэффициентов				Числитель – значение параметра по формуле; знаменатель – значение параметра по экспери- менту
				b	d	d	28 сут	
Серия 1	1	2	3	4	5	6	7	8
	R_{cjk} , МПа	$R_{cjk} = \frac{a + bt}{1 + ct + dt^2}$	0,999	0,002236	19,416341	0,218030	-0,000008	$\frac{76,587}{76,7}$
	$R_{p,n}$, МПа	$R_{p,n} = \frac{a + bt}{1 + ct + dt^2}$	0,998	0,000516	0,837974	0,126155	-0,000001	$\frac{89,455}{87,5}$
	K_{1c} , МПа · м ^{0,5}	$K_{1c} = \frac{a + bt}{1 + ct + dt^2}$	0,996	0,000086	0,078655	0,119059	-0,000001	$\frac{94,474}{96,9}$
	$\mathfrak{I}_{a,3}$, $B^2 \cdot \text{см}^{-2}$	$\mathfrak{I}_{a,3} = \frac{a + bt}{1 + ct + dt^2}$	0,971	0,071756	0,000610	0,001113	0,000000	$\frac{101,892}{100,3}$
	R_{cjk} , МПа	$R_{cjk} = \frac{a + bt}{1 + ct + dt^2}$	0,995	-0,000370	104,974317	1,501684	-0,0000067	$\frac{94,474}{96,9}$
Серия 2	$R_{p,n}$, МПа	$R_{p,n} = \frac{a + bt}{1 + ct + dt^2}$	0,995	-0,005576	0,344227	0,052152	-0,000001	$\frac{6,814}{6,77}$
	K_{1c} , МПа · м ^{0,5}	$K_{1c} = \frac{a + bt}{1 + ct + dt^2}$	0,996	-0,000484	0,033061	0,050337	-0,000001	$\frac{6,697}{6,97}$
	$\mathfrak{I}_{a,3}$, $B^2 \cdot \text{см}^{-2}$	$\mathfrak{I}_{a,3} = \frac{a + bt}{1 + ct + dt^2}$	0,999	0,000098	0,006004	0,020063	-0,000001	$\frac{6,666}{6,79}$
								$\frac{0,679}{0,661}$

	$R_{cж}$, МПа	$R_{cж} = \frac{a + bt}{1 + ct + dt^2}$	0,999	-0,000768	36,252526	0,348925	0,000011	$\frac{94,175}{94,1}$	$\frac{101,854}{103,3}$	$\frac{98,626}{96,1}$	$\frac{93,583}{94,3}$
Серия 3	$R_{p,u}$, МПа	$R_{p,u} = \frac{a + bt}{1 + ct + dt^2}$	0,999	-0,001805	0,347490	0,043120	0,000001	$\frac{4,405}{3,98}$	$\frac{7,567}{6,9}$	$\frac{7,659}{6,71}$	$\frac{7,413}{6,55}$
	K_{lc} , МПа · м ^{0,5}	$K_{lc} = \frac{a + bt}{1 + ct + dt^2}$	0,999	-0,000177	0,031181	0,043579	0,000001	$\frac{0,393}{0,392}$	$\frac{0,672}{0,677}$	$\frac{0,680}{0,658}$	$\frac{0,659}{0,643}$
	$\mathfrak{I}_{a,e}$, В ² · см ⁻²	$\mathfrak{I}_{a,e} = \frac{a + bt}{1 + ct + dt^2}$	0,971	0,042182	0,000428	0,001262	0,000000	$\frac{0,052}{0,102}$	$\frac{0,145}{0,136}$	$\frac{0,242}{0,267}$	$\frac{0,284}{0,355}$
Серия 4	$R_{cж}$, МПа	$R_{cж} = \frac{a + bt}{1 + ct + dt^2}$	0,999	0,000199	39,589901	0,358064	0,000017	$\frac{100,417}{100,4}$	$\frac{107,703}{108,0}$	$\frac{102,418}{101,8}$	$\frac{94,862}{95,0}$
	$R_{p,u}$, МПа	$R_{p,u} = \frac{a + bt}{1 + ct + dt^2}$	0,999	-0,003154	0,288969	0,036204	0,000002	$\frac{4,013}{4,0}$	$\frac{7,329}{7,46}$	$\frac{7,207}{7,2}$	$\frac{6,653}{6,98}$
	K_{lc} , МПа · м ^{0,5}	$K_{lc} = \frac{a + bt}{1 + ct + dt^2}$	0,999	0,000407	0,028801	0,037156	0,000001	$\frac{0,395}{0,393}$	$\frac{0,721}{0,732}$	$\frac{0,731}{0,706}$	$\frac{0,704}{0,702}$
	$\mathfrak{I}_{a,e}$, В ² · см ⁻²	$\mathfrak{I}_{a,e} = \frac{a + bt}{1 + ct + dt^2}$	0,996	0,004073	0,005641	0,018616	-0,000003	$\frac{0,107}{0,117}$	$\frac{0,286}{0,255}$	$\frac{0,394}{0,416}$	$\frac{0,664}{0,634}$

И наконец, для параметра $\dot{\mathcal{E}}_{a,3}$ образцы контрольной серии 1 показали отклонение от +6,2 до -97,5 %, а образцы серий 2, 3 и 4 – от +6,9 до -0,0 %; от +6,6 до -96,1 % и от + 12,1 до -9,3 % соответственно.

Заключение. Таким образом, исходя из сравнения численных значений контролируемых параметров конструкционной прочности, полученных по математической модели, с результатами макроскопического эксперимента, с учетом достоверного интервала отклонений численных значений названных параметров в контрольные сроки, а также с учетом коэффициентов корреляции рассматриваемых зависимостей, можно констатировать, что для образцов серии 1 найденную функцию можно использовать как феноменологическую прогностическую модель для оценки параметров $R_{cж}$, $R_{p,i}$ и K_{1c} во временном интервале от 28 сут до 9,5 лет.

Для образцов серии 2 эту функцию можно использовать в качестве феноменологической прогностической модели (с определенным приближением) лишь для параметра $R_{cж}$.

Для образцов серии 3 эту функцию в качестве феноменологической (с определенным приближением) можно использовать для параметров $R_{cж}$ и K_{1c} .

Для образцов серии 4 эту функцию можно использовать как феноменологическую модель для параметров $R_{cж}$, $R_{p,i}$ и K_{1c} .

С учетом вышеизложенного по поводу высокой изменчивости параметра акустической эмиссии $\dot{\mathcal{E}}_{a,3}$, во всех сравниваемых сериях цементного камня в рассматриваемом диапазоне времени полученную общую математическую модель нельзя использовать в качестве прогностической, вероятно, из-за высокой чувствительности акустико-эмиссионного устройства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.
2. Бабков В.В., Мохов В.Н., Капитонов С.М., Комохов П.Г. Структурообразование и разрушение цементных бетонов. Уфа: ГУП «Уфимский полиграфкомбинат», 2002. 376 с.
3. Волженский А.В. Влияние концентрации вяжущих на их прочность и деформативность при твердении // Бетон и железобетон. 1986. № 4. С. 11–12.
4. Брунауэр С., Кантро Д.Л. Гидратация трех- и двухкальциевого силиката в температурном интервале 5–500 °C // Химия цементов / под ред. Х.Ф. Тейлора. М.: Стройиздат, 1969. С. 214–232.
5. Мчедлов-Петросян О.П., Чернявский В.Л., Ольгинский А.Г. Поздние стадии гидратации цемента // Цемент. 1982. № 9. С. 15–17.
6. Сычев М.М. Некоторые вопросы химии бетона и цементного камня // Журн. прикл. химии АН СССР. 1981. Т. LIV. № 9. С. 2036–2043.
7. Гениев Г.А. Практический метод расчета длительной прочности бетона // Бетон и железобетон. 1995. № 4. С. 25–27.
8. Максимова И.Н., Макридин Н.И. О кинетических зависимостях процессов структурообразования и твердения цементных композитов // Региональная архитектура и строительство. 2017. № 4(33). С. 29–35.
9. Макридин Н.И., Максимова И.Н., Ерофеев В.Т., Полубарова Ю.В. Комплексная оценка параметров качества структуры и механики разрушения цементного камня // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 3 (675). С. 14–22.

10. Макридин Н.И., Королев Е.В., Максимова И.Н. Структурообразование и конструкционная прочность цементных композитов. М.: МГСУ, 2013. 152 с.
11. Granju I.L., Maso I.S. Loi de Resistance Simple des Pates Pures de Ciment Portland Conservees dans l'eau // Cem. and Concr. Res. 1980. Vol. 10. No. 5. P. 611–621.
12. Бабков В.В., Сахибгараев Р.Р., Чуйкин А.Е., Терехов И.Г., Кабанец В.В. Твердение и деструкция цементного камня при длительных условиях // Химия и технологические процессы. 2005. Т. 3. С. 275–280.
13. Серых Р.Л., Ярмаковский В.Н. Нарастание прочности бетона во времени // Бетон и железобетон. 1992. № 3. С. 19–21.
14. Пиратов К.А., Савицкий Н.В. Механика разрушения и теория железобетона // Бетон и железобетон. 2014. № 4. С. 23–25.

Максимова Ирина Николаевна, канд. техн. наук, доц.;

E-mail: maksimovain@mail.ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Ерофеев Владимир Трофимович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: fac-build@adm.mrsu.ru

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва

Макридин Николай Иванович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: makridin1934@mail.ru

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Получено 20.02.18

Maksimova Irina Nikolaevna, PhD, Ass. Professor; E-mail: maksimovain@mail.ru

Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Erofeev Vladimir Trofimovich, Academician of RAACS, DSc, Professor;

E-mail: fac-build@adm.mrsu.ru

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Makridin Nikolay Ivanovich, DSc, Professor; E-mail: makridin1934@mail.ru

Penza State University of Architecture and Construction, Russia

KINETIC PARAMETERS OF HYDRAULIC STRUCTURAL

FORMATION AND CEMENT OF CEMENT STONE

IN AGE UP TO 9,5 YEARS AFTER PREPARATION

Experimental data on the effect of the quantitative dosage and the procedure for dosing the superplasticizer S-3 on the character of the change in the structural strength parameters of the cement stone in the time range from 28 days to 9,5 years are presented. Mathematical models of the change in tensile strength for axial compression, tensile strength at bending, critical stress intensity factor and acoustic emission energy are obtained. A comparative evaluation of the above parameters obtained as a result of a physical experiment and on the basis of phenomenological models is made. It is shown that the modification of the cement stone structure by the superplasticizer leads not only to a noticeable change in the numerical values of structural strength parameters, but also to a more noticeable fluctuation of the deviations of the parameters considered, experimentally and by analytical formula, in the test time limits. At the same time, with respect to the axial compression strength parameter, the parameters, and EAE from the oscillation of the numerical deviations are more structurally sensitive parameters.

К e y w o r d s: cement stone, superplasticizer C-3, cement paste preparation procedure, structure formation, hardening, strength, stress intensity factor, acoustic emission, structural strength parameters.

REFERENCES

1. A k h v e r d o v I.N. Osnovy fiziki betona [Fundamentals of concrete physics]. Moscow, Stroyizdat, 1981. 464 p. (in Russian)
2. B a b k o v V.V., M o k h o v V.N., K a p i t o n o v S.M., K o m o k h o v P.G. Strukturoobrazovanie i razrushenie tsementnykh betonov [Structurization and destruction of cement concretes]. Ufa, GUP «Ufimskiy poligrafkombinat», 2002. 376 p. (in Russian)
3. V o l z h e n s k i y A.V. Vliyanie kontsentratsii vyazhushchikh na ikh prochnost' i deformativnost' pri tverdenii [Influence of binder concentration on their strength and deformability in hardening]. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 1986. No. 4. Pp. 11–12. (in Russian)
4. B r u n a u e r S., C a n t r o D.L. Gidratatsiya trekh- i dvukhkal'tsievogo silikata v temperaturnom intervale 5–500 °C [Hydration of three- and dicalcium silicate in the temperature range 5–500 °C]. Khimiya tsementov. Pod red. Kh.F. Teylora [Chemistry of Cement. Ed. by H.F. Taylor]. Moscow, Stroyizdat, 1969. Pp. 214–232. (in Russian)
5. M c h e d l o v - P e t r o s y a n O.P., C h e r n y a v s k i y V.L., O l 'g i n s k i y A.G. Pozdnie stadii gidratatsii tsementa [Late cement hydration]. Tsement [Cement]. 1982. No. 9. Pp. 15–17. (in Russian)
6. S y c h e v M.M. Nekotorye voprosy khimii betona i tsementnogo kamnya [Some questions of chemistry of concrete and cement stone]. Zhurnal prikladnoy khimii AN SSSR [Journal of Applied Chemistry of the USSR Academy of Sciences]. 1981. Vol. LIV. No. 9. Pp. 2036–2043. (in Russian)
7. G e n i e v G.A. Prakticheskiy metod rascheta dlitel'noy prochnosti betona [Practical method for calculating the durability of concrete]. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 1995. No. 4. Pp. 25–27. (in Russian)
8. M a k s i m o v a I.N., M a k r i d i n N.I. O kineticheskikh zavisimostyakh protsessov strukturoobrazovaniya i tverdeniya tsementnykh kompozitov [On the kinetic dependencies of the processes of structure formation and hardening of cement composites]. Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo [Regional architecture and construction]. 2017. No. 4 (33). Pp. 29–35. (in Russian)
9. M a k r i d i n N.I., M a k s i m o v a I.N., E r o f e e v V.T., P o l u b a r o v a Yu.V. Kompleksnaya otsenka parametrov kachestva struktury i mekhaniki razrusheniya tsementnogo kamnya [Complex assessment of the quality parameters of the structure and mechanics of destruction of cement stone]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No. 3 (675). Pp. 14–22. (in Russian)
10. M a k r i d i n N.I., K o r o l e v E.V., M a k s i m o v a I.N. Strukturoobrazovanie i konstruktionsnaya prochnost' tsementnykh kompozitov [Structurization and structural strength of cement composites]. Moscow, MSUCE, 2013. 152 p. (in Russian)
11. G r a n j u I.L., M a s o I.S. Loi de Resistance Simple des Pates Pures de Ciment Portland Conservees dans l'eau. Cem. and Concr. Res. 1980. Vol. 10. No. 5. Pp. 611–621.
12. B a b k o v V.V., S a k h i b g a r e e v R.R., C h u y k i n A.E., T e r e k h o v I.G., K a b a n e t s V.V. Tverdenie i destruktsiya tsementnogo kamnya pri dlitel'nykh usloviyakh [Hardening and destruction of cement stone under long-term conditions].

- Khimiya i tekhnologicheskie protsessy [Chemistry and technological processes]. 2005. Vol. 3. Pp. 275–280. (in Russian)
13. S e r y k h R.L., Y a r m a k o v s k i y V.N. Narastanie prochnosti betona vo vremeni [Increasing the strength of concrete in time]. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 1992. No. 3. Pp. 19–21. (in Russian)
14. P i r a d o v K.A., S a v i t s k i y N.V. Mekhanika razrusheniya i teoriya zhelezobetona [Mechanics of destruction and theory of reinforced concrete]. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 2014. No. 4. Pp. 23–25. (in Russian)
-

УДК 691.327 : 620.193

В.П. СЕЛЯЕВ, А.А. СЕДОВА, Л.И. КУПРИЯШКИНА,
А.К. ОСИПОВ, А.В. БАЛАНДИНА

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ НА ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ, НАПОЛНЕННОГО ПРИРОДНЫМИ ЦЕОЛИТАМИ

Агрессивная окружающая среда негативно влияет на состояние строительных материалов. Воздействие солей, углекислого газа, воды, а также перепады температур (циклы заморозков – оттепелей) зачастую приводят к коррозии. Поэтому защита бетона от коррозии – важнейшая задача при строительстве или эксплуатации строительных объектов. Посредством статического контакта фаз в настоящей работе изучено взаимодействие природных и сточной воды с цементным камнем. Проведен кинетический анализ системы «цементный камень–вода». Сделан вывод о коррозии цементного камня в зависимости от природы воды и степени наполнения цеолит-содержащей породой.

Ключевые слова: цементный камень, цеолитсодержащая порода, электропроводность, окисляемость, агрессивная углекислота, прочность.

Много внимания в последние годы уделяется благоустройству городских территорий, районных центров. При этом широко применяются для оформления пешеходных, рекреационных зон, малых архитектурных форм изделия из цементных композитов, которые должны по качеству, экологичности, эстетичности, стоимости отвечать нормативным, архитектурным требованиям. Однако практика показывает, что эффективность применения бетонных изделий зависит от экологии окружающей среды, которая качественно отличается в пределах города, региона.

Экосистема каждого микрорайона зависит от природных и антропогенных воздействий и характеризуется составом атмосферы, почвы, воды, акустической среды [1].

Целью настоящей работы является изучение влияния экосистемы микрорайона на свойства изделий из цементных композитов. В качестве основного показателя состояния экосистемы принят состав сточной воды. Анализ состава сточных вод проводился на пробах, отобранных в трех районах: центральный г. Саранска; промышленный пригород пос. Николаевка; сельскохозяйственный район Ичалковский (Республика Мордовия). Химический состав природной и сточной воды приведен в табл. 1, 2. Выбор состава сточных вод в качестве основного показателя состояния экосистемы обусловлен тем, что состав сточных вод наиболее полно отражает антропогенное воздействие на природу (кислотные дожди, состав атмосферы, антиобледенители, технические сбросы и т.д.); влияет на подземные и надземные сооружения и покрытия, а также на деградацию изделий из цементных композиционных материалов [2, 3].

Химическим анализом установлено, что сточная и природные воды являются жесткими, сильноминерализованными, имеют высокую окисляемость;

© Селяев В.П., Седова А.А., Куприяшкина Л.И., Осипов А.К., Баландина А.В., 2018

Таблица 1. Результаты химического анализа природной и сточной воды ($n = 3$; $t_{p,f} = 4,3$; $p = 0,95$)

Тип воды	рН	$\bar{x} \pm \frac{t_{p,f} \cdot S}{\sqrt{n}}$					
		Жесткость воды, ммоль-экв./л			Оксисляемость, мгО ₂ /л	Электропроводность, мкСм/см	Агрессивная углекислота, мг/л
		общая	карбонатная	постоянная			
Сточная вода, г. Саранск	7,04	9,77 ±0,143	8,90 ±0,248	0,87 ±0,287	387,43 ±1,93	1186 ±2,48	44,00 ±0,287
Ичалковский район, с. Селище	7,25	8,88 ±0,072	4,93 ±0,143	3,95 ±0,124	361,9 ±1,29	863,9 ±0,94	22,00 ±0,248
Пос. Николаевка, г. Саранск	6,92	12,63 ±0,287	8,17 ±0,143	4,47 ±0,379	40,1 ±1,63	1395 ±1,43	26,60 ±0,143

Таблица 2. Результаты химического анализа природной и сточной воды ($n = 3$; $t_{p,f} = 4,3$; $p = 0,95$)

Тип воды	$\bar{x} \pm \frac{t_{p,f} \cdot S}{\sqrt{n}}$, мг/л							
	Концентрация ионов							
	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻
Сточная вода, г. Саранск	184,251 ±0,012	11,652 ±0,004	93,963 ±0,009	45,060 ±0,007	7,518 ±0,007	369,107 ±1,356	285,723 ±0,767	5,786 ±0,003
Ичалковский район, с. Селище	31,957 ±0,024	1,725 ±0,008	146,303 ±0,015	12,205 ±0,003	4,732 ±0,006	109,967 ±0,165	63,604 ±0,017	0,779 ±0,002
Пос. Николаевка, г. Саранск	49,876 ±0,013	0,591± 0,001	177,183 ±0,351	32,844 ±0,025	4,970 ±0,003	130,181 ±0,205	116,741 ±0,108	< 0,5

наиболее высокое содержание агрессивной углекислоты установлено в сточной воде; высокой электропроводностью обладает вода пос. Николаевка и г. Саранска; в сточной воде г. Саранска повышенное содержание ионов хлора и сульфатов; представленные пробы являются агрессивными по отношению к бетону.

Влияние природной и сточной воды на свойства изделий изучалось на образцах цементных композитов, наполненных цеолитсодержащей породой, мас.% : 0, 10, 20, 30. Подготовленные образцы помещали в емкость (по 5 образцов в каждую) и заливали 350 мл воды; выдерживали 7, 21, 56 сут, контролируя концентрацию катионов и анионов с помощью ионного анализатора PIA-1000. Через 7, 14, 28 сут образцы вынимали из раствора, просушивали на фильтровальной бумаге на воздухе. Прочность композитов на сжатие определяли на разрывной машине Р-20 со шкалой 4 т. Фильтрат отделяли от выделившегося осадка и анализировали на содержание ионов магния и кальция методом ионной хроматографии. Содержание сульфат-ионов и оксида кремния (IV) определяли спектрофотометрическим методом. Осадки, выделенные из фильтрата, сушили при температуре 100–120 °C и определяли их элементный состав рентгенофлуоресцентным методом.

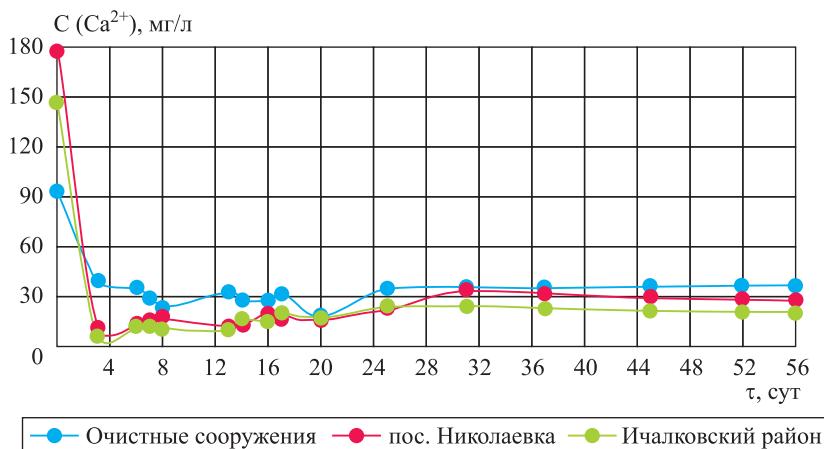


Рис. 1. Динамика изменения концентрации ионов кальция в фильтрате цементного камня, наполненного ЦСП на 20 %, при выдержке в природной и сточной воде

При контакте цементного камня с водой происходит резкое понижение концентрации ионов кальция в воде в первые 7 дней (рис. 1). Это связано с тем, что гидроксид кальция бетона и ионы кальция воды вступают в реакцию с F^- , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , вероятно, образуют малорастворимые соединения: CaF_2 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, CaSO_4 , а также $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$.

Концентрация ионов магния также понижается во времени выдерживания цементного камня в воде. Ионы магния даже при незначительном их содержании в воде связывают гидроксид-ионы в труднорастворимое соединение $\text{Mg}(\text{OH})_2$, к тому же ионы Mg^{2+} могут участвовать в образовании $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$. Заметно, что концентрация ионов магния в растворе снижается в большей мере в сточной воде, где содержание фосфат-ионов больше, чем в природных водах (рис. 2).

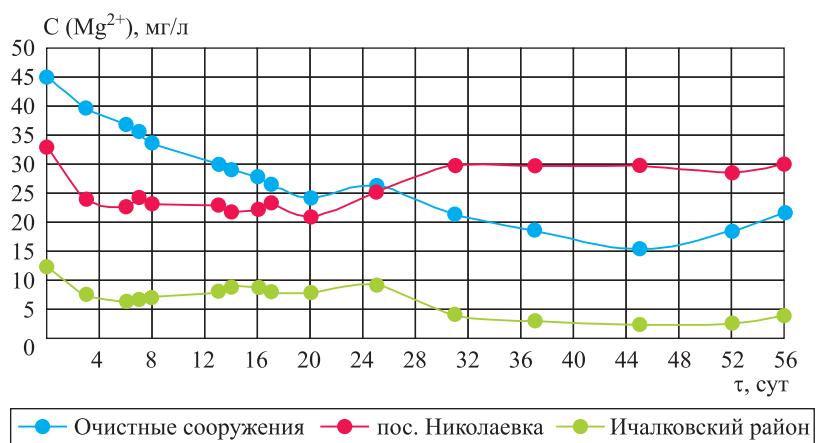
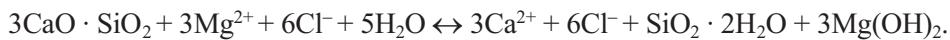
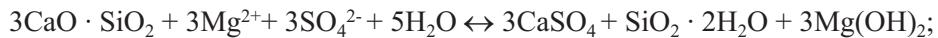


Рис. 2. Динамика изменения концентрации ионов магния в фильтрате цементного камня, наполненного ЦСП на 20 %, при выдержке в природной и сточной воде. Ионы магния могут вступать в обменные реакции с ионами кальция

Можно полагать, что выщелачивание гидроксида кальция из бетона под действием воды приводит к протеканию обменной реакции:



При взаимодействии силиката кальция с сульфатом магния протекают процессы, при которых в порах и капиллярах бетона происходит накопление малорастворимых солей, кристаллизация которых вызывает возникновение напряжений в стенках пор и капилляров, приводящих к разрушению структуры бетона. Такими продуктами являются гипс и гидросульфоалюминат кальция (ГСАК) [4, 5].

При коррозии данного типа в начале образуется на поверхности бетона пленка, представляющая собой кристаллы гипса и ГСАК. Они создают высокое давление на стенки пор цементного камня и вызывают местные разрушения, образование трещин в бетоне [6, 7].

С добавлением ЦСП к цементу в процессе получения бетона доля CaO в нем понижается, что делает невозможным образование и существование многоосновных гидроалюминатов. Это препятствует образованию ГСАК и предотвращает разрушение бетона.

Показано, что концентрация ионов калия, натрия, хлорид-, нитрат-ионов в воде в процессе выдерживания цементного камня повышается (рис. 3, 4). Присутствие в воде солей, не вступающих в реакцию с элементами цементного камня, но повышающих ионную силу раствора, увеличивает выщелачивание CaO, т.е. способствует разрушению бетона.

На рис. 5 представлены кинетические кривые зависимости изменения pH растворов во времени выдерживания в системе «цементный камень – вода». Показано, что pH растворов увеличивается в первые сутки с 7,0 до 11,0, а затем монотонно понижается. Можно полагать, что в системе быстро наступает химическое равновесие независимо от степени наполнения и типа воды.

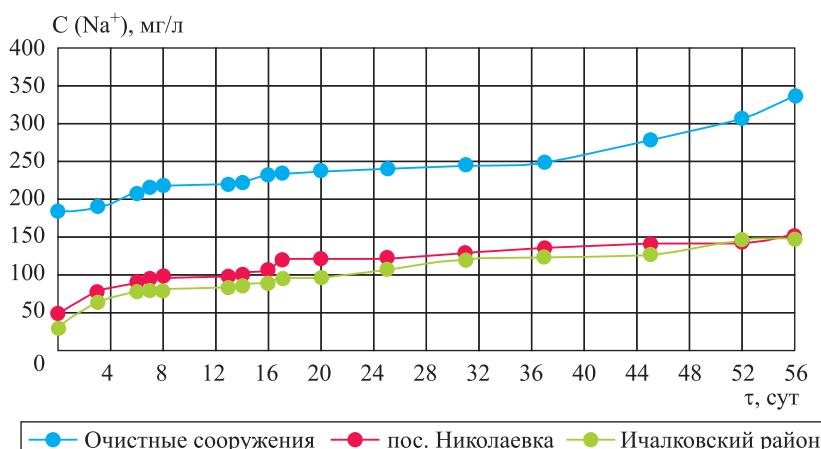


Рис. 3. Динамика изменения концентрации ионов натрия в фильтрате цементного камня, наполненного ЦСП на 20%, при выдержке в природной и сточной воде

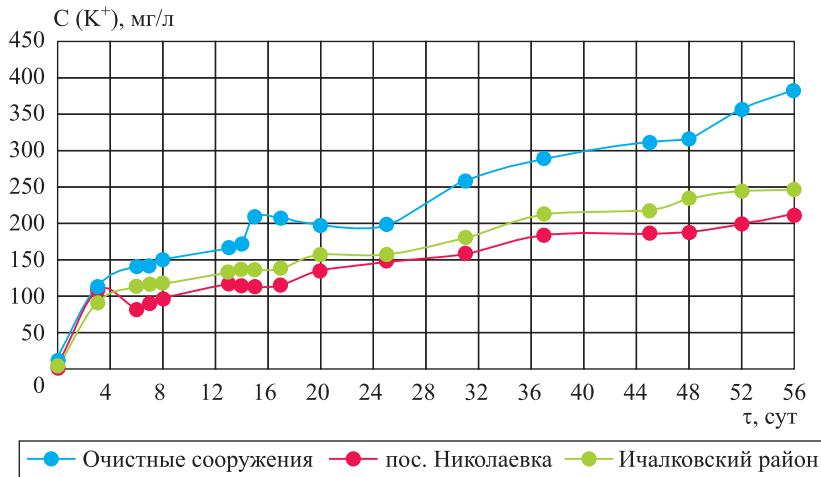


Рис. 4. Динамика изменения концентрации ионов калия в фильтрате цементного камня, наполненного ЦСП на 20 %, при выдержке в природной и сточной воде

В процессе выдерживания цементного камня в различных типах вод наблюдали помутнение раствора с выпадением осадка. Масса осадка увеличивалась во времени контакта раствора с цементным камнем. По истечении 7,

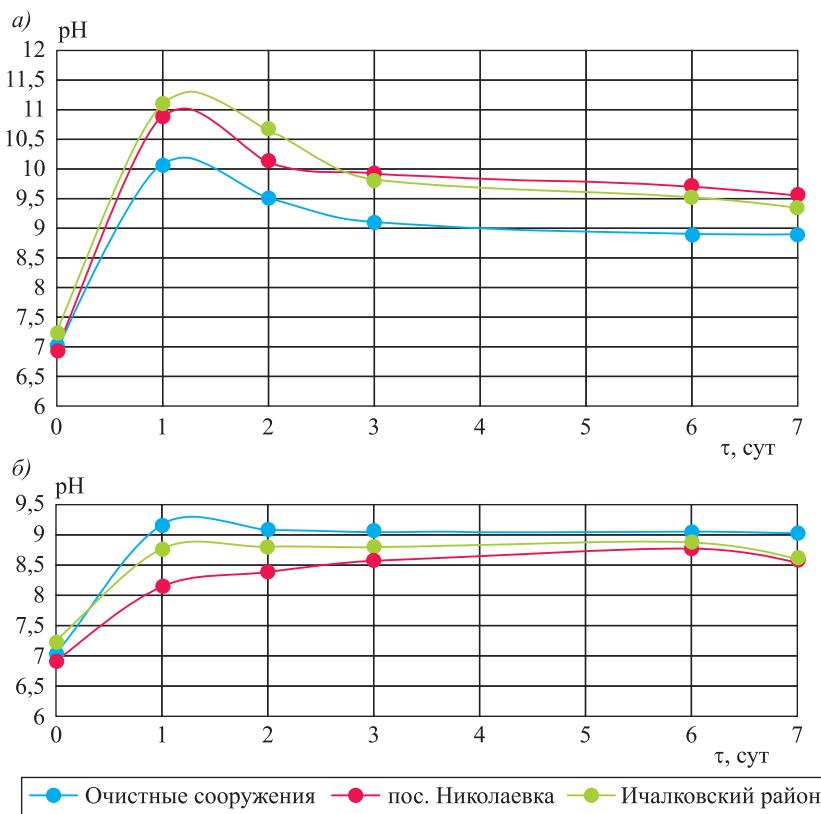


Рис. 5. Динамика изменения pH среды при выдерживании цементного камня, наполненного ЦСП на 0 % (а) и 30 % (б) в природной и сточной воде в течение 7 сут

Таблица 3. Результаты анализа осадка, полученного в процессе контакта цементного камня с водой в течение 7, 21, 56 сут

τ, сут	Тип воды	ЦСП, %	Содержание оксидов, %									
			CaO	MgO	K ₂ O	SiO ₂	SrO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅	
7	Пос. Николаевка Ичалковский район	0	90,60	1,86	0,099	0,449	0,372	1,59	—	0,424	0,182	
21		0	91,24	1,39	0,228	3,04	0,589	—	0,027	0,287	0,218	
7		0	94,71	1,51	0,263	2,12	0,258	—	0,041	0,254	0,435	
21		0	93,55	2,15	0,334	2,66	0,328	—	0,048	0,223	0,500	
56		0	94,81	1,92	0,327	1,63	0,551	0,325	0,030	0,176	0,262	
		10	92,46	3,25	0,354	2,64	0,403	0,325	0,039	0,240	0,168	
		20	94,22	2,38	0,223	2,38	0,239	—	0,045	0,311	0,193	
		30	94,65	1,39	0,244	2,52	0,276	0,306	0,057	0,280	0,196	

21, 56 сут композиты отделяли от раствора. Осадок отфильтровывали, просушивали до постоянной массы в сушильном шкафу при 100–150 °C и взвешивали. Элементный состав осадков определяли рентгенофлуоресцентным методом.

Данные табл. 3 свидетельствуют о том, что осадки, выделенные из цементного камня, состоят больше чем на 90 % из оксида кальция. В меньшем количестве содержатся оксиды магния MgO, кремния SiO₂, железа Fe₂O₃, стронция SrO, фосфора P₂O₅ и др.

Коррозия цементного камня обусловлена понижением концентрации кальция в бетоне. Это основная причина коррозии бетона. При потере бетоном кальция до 30 % происходит его частичное или полное разрушение [8].

Результаты измерения электропроводности фильтратов после отделения цементного камня представлены в табл. 4, данные которой свидетельствуют о повышении электропроводности фильтратов по сравнению с исходной водой. Высокой электропроводностью обладает фильтрат после выдержки цементного камня в сточной воде, несколько ниже в природной воде. Повышение электропроводности свидетельствует об увеличении концентра-

Таблица 4. Значения электропроводности природных и сточных вод после выдержки цементного камня, наполненного ЦСП

τ, сут	Электропроводность, мкСм/см											
	Очистные сооружения, г. Саранск				Пос. Николаевка, г. Саранск				Ичалковский район, с. Селище			
	ЦСП, %				ЦСП, %				ЦСП, %			
	0	10	20	30	0	10	20	30	0	10	20	30
7	2606	2201	2206	1876	1841	1600	1239	1277	1748	1489	1117	998,0
21	2927	2456	2420	2294	2369	1830	1439	1434	2232	1741	1340	1267
56	3961	4563	3596	3689	2897	2481	1942	1648	2849	2183	1947	1675

Таблица 5. Прочность цементных композитов на сжатие

Тип воды	τ , сут	ЦСП, %	$R_{сж}$, МПа
Сточная вода, г. Саранск	7	0	55,46
			51,55
	21	0	51,33
			60,13
	7	10	60,73
			57,90
	56		53,61
			55,14
	Пос. Николаевка, г. Саранск	21	0
		10	52,90
		20	51,68

ции ионов, вымываемых из цементного камня. Электропроводность фильтратов также зависит от содержания ЦСП в цементном камне. С увеличением массовой доли ЦСП от 10 до 30 % электропроводность понижается, следовательно, снижается коррозия цементного камня.

Значения прочности цементных композитов после контакта с водой представлены в табл. 5. Результаты эксперимента показали, что прочность композитов также зависит от степени наполнения их цеолитсодержащей породой, от типа воды и контакта их с водой.

Наиболее высокой прочностью обладают цементные композиты, наполненные ЦСП на 10 % и выдер-

жанные в сточной воде очистных сооружений г. Саранска в течение 7 сут. Несколько уступает по прочности композит, наполненный ЦСП на 20 % и выдержанный в сточной воде в течение 21 сут.

Выводы. 1. Сточные и природные воды отличаются по составу и физико-химическим характеристикам и являются агрессивными по отношению к бетону, вызывая коррозию, понижение прочности.

2. При экспонировании образцов цементного камня в воде выпадает осадок, масса которого больше в фильтрате из цементного камня без наполнения ЦСП. Вероятно, ЦСП связывает гидрат окиси кальция в цементном камне, что повышает устойчивость бетона к коррозии и снижает вымывание CaO из бетона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волкова Н.Г., Попова Ю.К. Триединая задача экологии применительно к проблемам строительства // ACADEMIA. 2009. № 5. С. 108–117.
2. Селяев В.П., Осипов А.К., Куприяшкина Л.И. Оптимизация составов цементных композиций, заполненных цеолитами // Изв. вузов. Строительство. 1999. № 4. С. 36–39.
3. Королева Е.Л., Матвеева Е.Г., Науменко О.В., Нырикова Т.Н. Исследование коррозионной стойкости модифицированного бетона в среде сточных вод // Вестн. МГСУ. 2013. № 2. С. 101–107.
4. Морозова Н.Н. Модификация портландцемента цеолитсодержащей породой для получения смешанного вяжущего: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань, 1997. 18 с.
5. Морозова Н.Н., Кайс Х.Л., Потапова Л.И. Эффективность химических добавок при модификации природного цеолита для цементных бетонов // Влияние науки и инновационное развитие. Уфа, 2015. С. 29–32.
6. Якимова А.В., Бурова А.Н. Цеолитсодержащие породы Татарстана и их применение. Казань: Фэн, 2001. 172 с.

7. Панина А.А., Корнилов А.В. Активированные дисперсные минеральные наполнители для портландцемента // Стройт. материалы. 2013. № 12. С. 74–77.
8. Лурье Ю.Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод. М.: Химия, 1984. 448 с.

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

E-mail: ntorm80@mail.ru

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

Седова Анна Алексеевна, канд. хим. наук, доц.

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

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

E-mail: kupriashkina.liudmila@yandex.ru

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

Осипов Анатолий Константинович, канд. хим. наук, доц.

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

Баландина Анастасия Владимировна, инж.

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

Получено 20.02.18

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

E-mail: ntorm80@mail.ru

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Sedova Anna Alekseevna, PhD, Ass. Professor

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Kupriyashkina Lyudmila Ivanovna, PhD, Professor

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Osipov Anatoliy Konstantinovich, PhD, Ass. Professor

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Balandina Anastasia Vladimirovna, Engineer

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

THE INFLUENCE OF WATER CHEMISTRY ON DURABILITY OF CEMENT STONE, FILLED WITH NATURAL ZEOLITES

The aggressive environment negatively affects the condition of building materials. Effects of salts, carbon dioxide, water, and temperature changes (cycles of frost – thaw) often lead to corrosion. Therefore protection of concrete against corrosion—the most important task at construction or operation of construction objects. The interaction of natural and waste water with cement stone is studied in this paper by means of static phase contact. The kinetic analysis of the «cement stone–water» system is carried out. The conclusion about cement stone corrosion depending on the nature of water and the degree of filling with zeolite-containing rock is made.

К e y w o r d s: cement stone, zeolite-containing rocks, electrical conductivity, oxidability, carbon dioxide aggressive, strength.

REFERENCES

1. Volkova N.G., Popova Yu.K. Triedinaya zadacha ekologii primenitel'no k problemam stroitel'stva [Triune task of ecology in relation to construction]. ACADEMIA. 2009. No. 5. Pp. 108–117. (in Russian)
2. Selyaev V.P., Osipov A.K., Kupriyashkina L.I. Optimizatsiya sostavov tsementnykh kompozitsiy, zapolnennykh tseolitami [Optimization of the composition of TSE-cement compositions, filled with zeolites]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 1999. No. 4. Pp. 36–39. (in Russian)
3. Koroleva E.L., Matveeva E.G., Naumenko O.V., Nyrikova T.N. Issledovanie korrozionnoy stoykosti modifitsirovannogo betona v srede stochnykh vod [Study of corrosion resistance of modified concrete in the sewage medium]. Vestnik MGSU [Bulletin MSSU]. 2013. No. 2. Pp. 101–107. (in Russian)
4. Morozova N.N. Modifikatsiya portlandsementa tseolitsoderzhashchey porodoy dlya polucheniya smeshannogo vyazhushchego: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Modification of cement pore zeolite containing water to obtain a mixed binder: author. diss. ... PhD]. Kazan', 1997. 18 p. (in Russian)
5. Morozova N.N., Kays Kh.L., Potapova L.I. Effektivnost' khimicheskikh dobavok pri modifikatsii prirodnogo tseolita dlya tsementnykh betonov [Effectiveness of chemical additives in the modification of natural zeolite for cement concrete]. Vliyanie nauki i innovatsionnoe razvitiye [In the book: the impact of science and innovative development]. Ufa, 2015. Pp. 29–32. (in Russian)
6. Yakimova A.V., Bursova A.N. Tseolitsoderzhashchie porody Tatarstana i ikh primenenie [Zeolite-containing rocks of Tatarstan and their application]. Kazan', Fen, 2001. 172 p. (in Russian)
7. Panina A.A., Kornilov A.V. Aktivirovannyye dispersnye mineral'nye napolniteli dlya portlandsementa [Activated dispersed mineral fillers for Portland cement]. Stroitel'nye materialy [Building material]. 2013. No. 12. Pp. 74–77. (in Russian)
8. Lur'e Yu.Yu. Analiticheskaya khimiya promyshlennyykh stochnykh vod [Analytical chemistry of industrial wastewater]. Moscow, Chemistry, 1984. 448 p. (in Russian)

УДК 624.01/04 : 691.32

Д.И. КОРОВКИН, Т.А. НИЗИНА, Л.В. МАКАРОВА, А.С. БАЛЫКОВ,
В.В. ВОЛОДИН

**АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ ВЛАЖНОСТНОГО СОСТОЯНИЯ
И ТЕМПЕРАТУРЫ ИСПЫТАНИЙ***

На примере мелкозернистого бездобавочного бетона исследовано влияние температуры испытания на изменение прочностных показателей цементных композитов в различном влажностном состоянии (сухое, равновесно-влажностное, влагонасыщенное). Выявлено положительное влияние отрицательных температур на повышение пределов прочности при сжатии мелкозернистых бетонов, находящихся во влагонасыщенном состоянии, по сравнению с сухими и равновесно-влажностными композитами (на 20 и 16 % соответственно) и на растяжение при изгибе (на 91 и 71 %). Исследовано падение упругопрочных показателей с повышением температуры испытания влагонасыщенных композитов (влагосодержание более 6 %) и равновесно-влажностных (с содержанием влаги 2÷3 %) в рамках действия эффекта Ребиндера.

Ключевые слова: мелкозернистый бетон, влагосодержание, температурно-влажностный режим, эффект Ребиндера, показатели пористости.

За последние десятилетия технология бетонов претерпела ряд концептуально-методологических и технических прорывов, что в первую очередь касается «высокотехнологичных бетонов», к которым относятся бетоны на основе вяжущих низкой водопотребности, наполненных и тонкомолотых цементов, быстротвердеющих и особо быстротвердеющих цементов, а также бетоны супер- и гиперпластифицированные, поризованные, дисперсно-армированные, высокодисперсные (порошковые), получаемые введением в их состав микро- и наноразмерных структурных составляющих [1, 2]. Несмотря на это, достаточно большой спрос на строительном рынке все также имеют «классические» трех-, четырехкомпонентные бездобавочные бетоны, характеризующиеся развитой поровой структурой [3]. Кроме того, подобные бетоны активно использовались при изготовлении бетонных и железобетонных изделий и конструкций ранее.

В реальных климатических условиях на строительные изделия и конструкции оказывается непрерывное воздействие множества агрессивных факторов (перепад температур, солнечного света, проникающей радиации, влаги, кислорода и т.д.) и их комбинаций [4]. Из всей совокупности воздействий эксплуатационной среды температурно-влажностные факторы являются постоянно действующими и вызывают в соответствии с годовыми циклическими варьированиями (разогрев–остывание, увлажнение–высушивание)

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-33-50051.

наибольшее воздействие на изменение практически всех основных свойств бетонов – прочности, деформативности, теплопроводности, морозостойкости и т.д. [3, 5–8].

Влияние параметров температурно-влажностного состояния материала на показатели его сопротивления разрушению предлагается рассматривать в рамках действия эффекта Ребиндера [9–12], в соответствии с которым эффект снижения прочности определяется тремя группами факторов:

- химическим средством адсорбционно-активной среды и материала;
- гетерогенностью и дефектностью структуры материала;
- условиями деформирования и разрушения материала (температура, вид и скорость приложения внешних механических воздействий, фазовое состояние адсорбционно-активной среды, ее объемное содержание).

Факторы первой и второй групп отражают механизм зарождения и развития трещин в присутствии адсорбционно-активной среды. Факторы третьей группы, имеющие кинетический смысл, отражают связь роста макроскопических трещин разрушения со скоростью поступления жидкой фазы в их вершину; все явления, вызывающие ускорение распространения жидкой фазы в структуре материала, способствуют также и усилению эффекта понижения прочности [9–12].

Благодаря обширной территории, климатические условия в нашей стране весьма разнообразны. Россия располагается в арктическом, субарктическом, умеренном и субтропическом климатах [13]. Согласно СП 131.13330.2012 «Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*», в летний период температура воздуха в Астраханской области может летом подниматься до +45 °C при относительной влажности 18–27 %. При этом в Арктической зоне Российской Федерации, к которой относятся Чукотский и Ненецкий автономные округа, Республика Саха и др., температура воздуха в зимний период может опускаться до $-65 \div 70$ °C при относительной влажности 82÷90 %. В связи с планами Минобороны России о строительстве более 100 капитальных военных объектов в Арктике, а также программы по расширению добычи нефти и газа в северных регионах России и построения соответствующих терминалов для их транспортировки, исследование влияния различных температурно-влажностных режимов на физико-механические свойства бетона является актуальной задачей.

Цель представленных в данной работе исследований заключалась в изучении влияния температуры испытаний и влажности мелкозернистых бетонов на их упругопрочностные показатели. Экспериментальные исследования проводились на образцах в виде призм с размерами $40 \times 40 \times 160$ мм. В качестве вяжущего использовался портландцемент со шлаком класса ЦЕМ II/A-Ш 42,5Н ГОСТ 31108–2016 производства «Азия Цемент» Никольского района Пензенской области. Его активность на стандартном вольском песке по ГОСТ 310.4–81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии» на момент испытаний составляла 47,9 МПа. В качестве мелкозернистого заполнителя применялся речной песок с размером зерна менее 5 мм, добываемый в поселке Смольный Ичалковского района Республики Мордовия. Водоцементное отношение составляло 0,4.

Согласно оценке пористости мелкозернистых бетонов, проводимой в соответствии с ГОСТ 12730.4–78 «Бетоны. Методы определения показателей пористости», полный объем пор составил 26,6 %, объем открытых капиллярных пор – 13,2 %, показатель среднего размера открытых капиллярных пор – 0,134; показатель однородности размеров открытых капиллярных пор – 0,325.

После твердения в нормальных условиях в течение 28 сут образцы были разделены на три группы (по 40 образцов в каждой группе, что позволило испытывать на каждом уровне температуры и влажностного состояния от 6 до 8 образцов). Первая группа образцов высушивалась до постоянной массы в течение 14 сут при температуре 105 °C, вторая – выдерживалась этот же временной промежуток в нормальных лабораторных условиях (температура воздуха 20 ± 3 °C, влажность – 50 ± 5 %), третья – помещалась в воду для насыщения до постоянной массы.

Прочностные характеристики (предел прочности при сжатии и на растяжение при изгибе) определялись на установке WilleGeotechnik® (модель 13PD/401) для испытания строительных материалов [14]. Данный пресс, дополнительно оборудованный климатической камерой, позволяет регулировать влажность (от 10 до 96 %) и температуру (от –40 до +100 °C) среды испытания. Установка включает в себя высокоточную систему с разрешением более 1 млн шагов (20 бит) с тремя свободно переключаемыми каналами для каждой оси (усилие, перемещение, давление) и возможностью подключения до 16 дополнительных измерительных каналов. Настройка основных параметров и фиксирование полученных экспериментальных результатов осуществлялись с применением программного обеспечения GEOSYS 8.7.8. Скорость нагружения задавалась в виде постоянного прироста деформации во времени: для испытаний на растяжение при изгибе – 1 мм/мин, на сжатие – 2 мм/мин. Контроль и фиксация изменений напряжений и деформаций образца в процессе нагружения осуществлялись с шагом 0,01 с.

При проведении экспериментальных исследований варьируемыми факторами являлись: температура испытаний (–40, –20, 0, +20, +40 °C) и вид влажностного состояния образцов (сухое, равновесно-влажностное, влагонасыщенное). Перед испытанием образцы помещали в климатическую камеру с последующим доведением температуры в ней до требуемой. Постепенное изменение температурно-влажностного режима в климатической камере позволяет минимизировать вероятность появления внутренних напряжений в образцах в результате резкого изменения температуры. При помещении образцов в климатическую камеру в зависимости от влажностного состояния образцов (сухое, равновесно-влажностное, влагонасыщенное) относительная влажность в камере задавалась на уровнях 10, 50 и 90 %. Средняя скорость набора температуры и влажности в камере составляла 1 °C в минуту и 1 % в 10 с. При достижении требуемого уровня температурного воздействия образцы дополнительно выдерживались в климатической камере еще в течение одного часа.

При испытании в диапазоне отрицательных температур отмечается заметный прирост прочностных показателей с увеличением влаги в бетонных образцах с 0,4 до 6,8 % (рис. 1, 2). Предел прочности влагонасыщенных

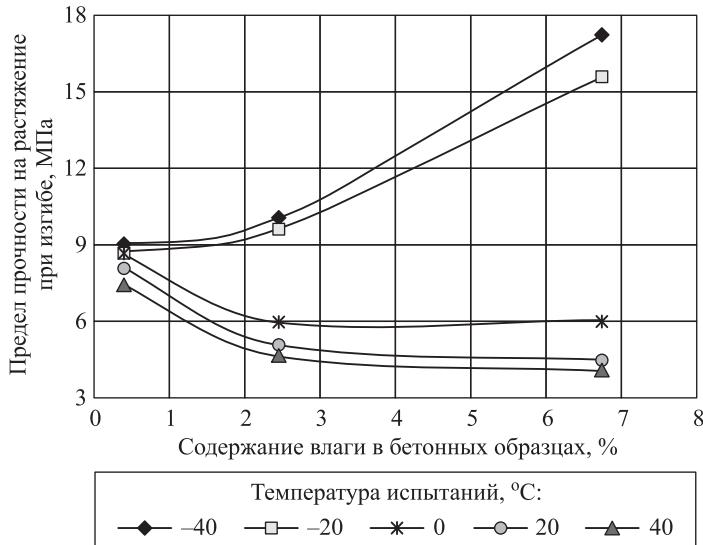


Рис. 1. Изменение предела прочности на растяжение при изгибе в зависимости от температуры испытаний и влажности бетонных образцов

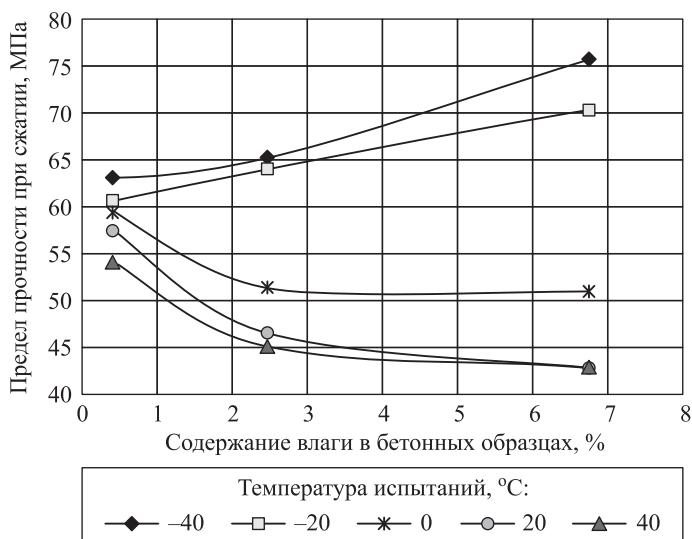


Рис. 2. Изменение предела прочности при сжатии в зависимости от температуры испытаний и влажности бетонных образцов

образцов (с содержанием влаги около 6,8 %) на растяжение при изгибе при -40°C на 91 % выше, чем у сухих образцов (влагосодержание менее 1 %), и на 71 % выше, чем у образцов в равновесно-влажностном состоянии (с содержанием влаги 2÷3 %). При испытаниях на воздействие сжимающих нагрузок прочностные показатели повышаются всего на 20 и 16 %. Подобное явление в первую очередь связано с образованием в структуре бетона криофазы, вследствие чего сопротивлению развития трещины препятствует не только сам материал, но и образовавшийся в порах лед.

При увеличении содержания влаги в образцах макропористых бетонов соответственно увеличивается и содержание доли легкозамерзаемой свободной воды в структуре бетона [10]. В процессе разрушения трещина, движущаяся в материале, встречает дополнительное сопротивление в виде ледяных фрагментов, увеличивая тем самым свой путь. Упрочнение происходит за счет затрат дополнительной энергии на разрушение и деформирование ледяных включений, отрыв льда от твердой фазы и т.д. [15–17].

Совсем иной характер изменения свойств в зависимости от влажности бетонов наблюдается при испытании образцов при нулевой и положительных температурах (см. рис. 1, 2). При повышении температуры от 0 до 40 °C наблюдается существенное снижение прочностных показателей исследуемого цементного композита, находящегося во влагонасыщенном и равновесно-влажностном состояниях. Такое падение описывается в рамках действия эффекта Ребиндера [9]. Вода, являющаяся адсорбирующим веществом, с повышением температуры быстрее проникает в устья микротрещин, создавая тем самым расклинивающее усилие, что облегчает деформирование, разрушение твердых тел и как следствие способствует снижению прочностных показателей.

Согласно анализу результатов экспериментального исследования, прочностные показатели композитов с пониженным содержанием влаги (менее 1 %) значительно меньше меняются в зависимости от температурного режима (см. рис. 1, 2). Повышение прочности сухих образцов как при сжатии, так и на растяжение при изгибе с понижением температуры с +40 до –40 °C составляет соответственно всего 17 и 22 %.

Заключение. Мелкозернистые бездобавочные бетоны из-за своей гетерогенной структуры, включающей многокомпонентные и многофазовые поликристаллические агрегаты, обладают достаточно развитым поровым пространством, что приводит к насыщению их влагой как при эксплуатации в нормальных влажностных условиях, так и при повышенной влажности окружающей среды. Варьирование температуры окружающей среды и содержания влаги в цементных композитах приводит к существенному изменению упругопрочных показателей бетона. При отрицательных температурах прочность влагонасыщенных образцов существенно выше аналогичных показателей образцов, находящихся в равновесно-влажностном и сухом состоянии. С повышением температуры происходит снижение вязкости жидкости, что способствует более быстрому доступу воды к вершинам трещин, возникновению расклинивающего усилия и как следствие снижению прочностных характеристик бетонов. Наименьшее изменение прочностных показателей в зависимости от температуры испытания наблюдается для образцов с пониженным содержанием влаги (менее 1 %).

Подобные изменения упругопрочных показателей мелкозернистых бетонов при воздействии различных температурно-влажностных режимов необходимо учитывать при проектировании конструкций зданий и сооружений для обеспечения их надежной работы в различных климатических условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чернышов Е.М., Славчева Г.С., Ким Л.В. О конструкционном потенциале структуры высокотехнологичных бетонов с учетом температурно-влажностных эксплуатационных состояний // Строит. материалы. 2015. № 9. С. 3–17.
2. Низина Т.А., Селяев В.П., Балыков А.С., Володин В.В., Коровкин Д.И. Оптимизация составов многокомпонентных мелкозернистых фибробетонов, модифицированных на различных масштабных уровнях // Нанотехнологии в строительстве: науч. интернет-журн. 2017. Т. 9. № 2. С. 43–65.
3. Коротких Д.Н. Изменения структуры современных цементных бетонов и их конструкционного потенциала при длительном действии температурно-влажностного фактора в эксплуатационном цикле // Науч. журн. Воронеж. ГАСУ. Стр-во и архитектура. 2014. № 2 (34). С. 34–43.
4. Селяев В.П., Низина Т.А., Артамонов Д.А., Низин Д.Р., Коровкин Д.И., Андronичев Д.О. Результаты испытания составов мелкозернистых бетонов, экспонированных в условиях воздействия климатических факторов // Стр-во и реконструкция. 2015. № 3 (59). С. 158–166.
5. Славчева Г.С. Структура высокотехнологичных бетонов и закономерности проявления их свойств при эксплуатационных влажностных воздействиях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2009. 44 с.
6. Балбалин А.В., Низин Д.Р., Низина Т.А., Балыков А.С. Исследование влияния температурно-влажностного режима на упруго-прочностные характеристики мелкозернистых бетонов // Материалы IX Междунар. конф. молодых ученых «Теория и практика повышения эффективности строительных материалов». Пенза: ПГУАС, 2014. С. 8–12.
7. Низина Т.А., Балбалин А.В., Низин Д.Р., Сарайкин А.С. Влияние температурно-влажностного режима на характеристики мелкозернистых бетонов // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: материалы тринадцатой междунар. науч.-техн. конф. В 2 ч. Ч. 1. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. С. 45–48.
8. Славчева Г.С. Влажностное состояние цементных и силикатных бетонов в связи с их структурой // Стр-во и архитектура. 2008. № 4. С. 119–131.
9. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах: избр. тр. М.: Наука, 1979. 384 с.
10. Братошевская В.В., Мирсоянов В.Н., Мирсоянов Р.В. Влияние колебаний влажности на напряженное состояние в структурах цементного камня и бетона // Соврем. наука: актуальные проблемы и пути их решения. 2015. № 1 (14). С. 18–21.
11. Братошевская В.В., Мирсоянов В.Н., Мирсоянов Р.В. Исследование напряженного состояния в цементном камне и бетоне при отрицательных температурах // Потенциал соврем. науки. 2016. № 5 (22). С. 5–8.
12. Славчева Г.С. Влияние температурно-влажностного состояния на закономерности изменения показателей сопротивления разрушению бетонов // Вестн. гражд. инженеров. 2010. № 1. С. 119–121.
13. Харламова Н.Ф. Физическая география и ландшафты России: практикум. Барнаул: АлтГУ, 2014. 120 с.
14. Низина Т.А., Селяев В.П. Материальная база вуза как инновационный ресурс развития национального исследовательского университета // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы всерос. науч.-техн. конф. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. С. 115–121.

15. В е р б и ц к и й Л.Н. Прочность и долговечность бетона в водной среде // Прочность и долговечность бетона: сб. науч. тр. М.: Стройиздат, 1976. С. 145–147.
16. И в а н о в а О.С., К р ы л о в Б.А. Влияние некоторых технологических факторов на прочность бетона в замороженном состоянии // Бетон и железобетон. 1972. № 11. С. 26–28.
17. П и р а д о в К.А. Исчерпание ресурса бетона при температурно-влажностных и силовых воздействиях // Бетон и железобетон. 1997. № 6. С. 26–28.

Коровкин Дмитрий Игоревич, асп.

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

Низина Татьяна Анатольевна, д-р техн. наук, доц.; E-mail: nizinata@yandex.ru

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

Макарова Людмила Викторовна, канд. техн. наук, доц.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Балыков Артемий Сергеевич, асп.

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

Володин Владимир Владимирович, асп.

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

Получено после доработки 12.02.18

Korovkin Dmitriy Igorevich, Post-graduate Student

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Nizina Tat'yana Anatol'evna, DSc, Ass. Professor; E-mail: nizinata@yandex.ru

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Makarova Lyudmila Viktorovna, PhD, Ass. Professor

Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Balykov Artemiy Sergeevich, Post-graduate Student

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Volodin Vladimir Vladimirovich, Post-graduate Student

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

ANALYSIS OF CHANGES IN STRENGTH CHARACTERISTICS OF FINE-GRAINED CONCRETE, DEPENDING ON MOISTURE STATUS AND TEMPERATURE TESTS

The effect of the test temperature on the change in the strength characteristics of cement composites in a different moisture state (dry, equilibrium-humid, moisture-saturated) was studied using the example of fine-grained no-additive concrete. The positive effect of freezing temperatures to increase the compressive strength of fine-grained concretes in the moisture saturated state in comparison with dry and equilibrium-humidity composites (by 20 and 16 %, respectively) and bending tensile (by 91 and 71 %) was revealed. Was studied falling of elastic-strength parameters with increase of test temperature of moisture-saturated composites (moisture content more than 6 %) and equilibrium-humidity (with moisture content 2÷3 %) within the action of Rebinder effect.

К e y w o r d s: fine-grained concrete, moisture content, temperature-humidity regime, Rebinder effect, porosity indices.

REFERENCES

1. Chernyshov E.M., Slavcheva G.S., Kim L.V. O konstruktionsnom potentsiale strukturny vysokotekhnologichnykh betonov s uchetom temperaturno-vlazhnostnykh ekspluatatsionnykh sostoyaniy [On the structural potential of the structure of high-tech concretes taking into account the temperature-humidity operational states]. Stroitel'nye materialy [Building material]. 2015. No. 9. Pp. 3–17. (in Russian)
2. Nizina T.A., Selyaev V.P., Balykov A.S., Volodin V.V., Korovkin D.I. Optimizatsiya sostavov mnogokomponentnykh melkozernistykh fibrobetonov, modifitsirovannykh na razlichnykh masshtabnykh urovnyakh [Optimization of compositions of multicomponent fine-grained fibroconcrete modified at various scale levels]. Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyy internet-zhurnal [Nanotechnology in construction: scientific journal of the Internet]. 2017. Vol. 9. No. 2. Pp. 43–65. (in Russian)
3. Korotkikh D.N. Izmeneniya strukturny sovremennoykh tsementnykh betonov i ikh konstruktionsnogo potentsiala pri dlitel'nom deystviyu temperaturno-vlazhnostnogo faktora v ekspluatatsionnom tsikle [Changes in the structure of modern cement concretes for their structural potential under the long-term action of the temperature-moisture factor in the operational cycle]. Nauchnyy zhurnal Voronezhskogo GASU. Stroitel'stvo i arkhitektura [Scientific journal of Voronezh State University. Construction and architecture]. 2014. No. 2 (34). Pp. 34–43. (in Russian)
4. Selyaev V.P., Nizina T.A., Artamonov D.A., Nizin D.R., Korovkin D.I., Andronichev D.O. Rezul'taty ispytaniya sostavov melkozernistykh betonov, eksponirovannykh v usloviyakh vozdeystviya klimaticeskikh faktorov [Results of testing the compositions of fine-grained concretes exhibited under climatic factors]. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya [Construction and reconstruction]. 2015. No. 3 (59). Pp. 158–166. (in Russian)
5. Slavcheva G.S. Struktura vysokotekhnologichnykh betonov i zakonomernosti proyavleniya ikh svoystv pri ekspluatatsionnykh vlazhnostnykh vozdeystviyakh: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk [The structure of high-tech concretes and patterns of manifestation of their properties under operational humidity influences: the author's abstract diss. ... PhD]. Voronezh, 2009. 44 p. (in Russian)
6. Balbalin A.V., Nizin D.R., Nizina T.A., Balykov A.S. Issledovanie vliyanija temperaturno-vlazhnostnogo rezhima na uprugo-prochnostnye kharakteristiki melkozernistykh betonov [Investigation of the influence of the temperature-humidity regime on the elastic-strength characteristics of fine-grained concrete]. Materialy IX Mezhdunar. konf. molodykh uchenykh «Teoriya i praktika povysheniya effektivnosti stroitel'nykh materialov» [Of the 9th International conferences young scientists «Theory and practice of improving the efficiency of building materials»]. Penza, PSUAC, 2014. Pp. 8–12. (in Russian)
7. Nizina T.A., Balbalin A.V., Nizin D.R., Saraykin A.S. Vliyanie temperaturno-vlazhnostnogo rezhima na kharakteristiki melkozernistykh betonov [Influence of the temperature-humidity regime on the characteristics of fine-grained concrete]. Aktual'nye voprosy arkhitektury i stroitel'stva: materialy trinadtsatoy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Topical issues of architecture and construction: proceedings of the thirteenth international scientific and technical conference]. In 2 parts. P. 1. Saransk, 2014. Pp. 45–48. (in Russian)
8. Slavcheva G.S. Vlazhnostnoe sostoyanie tsementnykh i silikatnykh betonov v svyazi s ikh strukturoy [The moisture state of cement and silicate concretes in connection with their structure]. Stroitel'stvo i arkhitektura [Construction and architecture]. 2008. No. 4. Pp. 119–131. (in Russian)

9. Rebindor P.A. Poverkhnostnye yavleniya v dispersnykh sistemakh: izbrannye trudy [Surface phenomena in disperse systems: selected works]. Moscow, Nauka, 1979. 384 p. (in Russian)
 10. Bratosheskaya V.V., Mirsoyanov V.N., Mirsoyanov R.V. Vliyanie kolebaniy vlazhnosti na napryazhennoe sostoyanie v strukturakh tsementnogo kamnya i betona [Influence of humidity fluctuations on the stressed state in the structures of cement stone and concrete]. Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy i puti ikh resheniya [Modern science: actual problems and ways of their solution]. 2015. No. 1 (14). Pp. 18–21. (in Russian)
 11. Bratosheskaya V.V., Mirsoyanov V.N., Mirsoyanov R.V. Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya v tsementnom kamne i betone pri otritsatel'nykh temperaturakh [Investigation of stress state in cement stone and concrete at negative temperatures]. Potentsial sovremennoy nauki [The potential of modern science]. 2016. No. 5 (22). Pp. 5–8. (in Russian)
 12. Slavcheva G.S. Vliyanie temperaturno-vlazhnostnogo sostoyaniya na zakonomernosti izmeneniya pokazateley sопrotivleniya razrusheniyu betonov [Influence of the temperature-humidity state on the regularity of the change in the resistance to the destruction of concrete]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of civil engineers]. 2010. No. 1. Pp. 119–121. (in Russian)
 13. Kharlamova N.F. Fizicheskaya geografiya i landshafty Rossii: praktikum [Physical geography and landscapes of Russia: practicum]. Barnaul, AltGU, 2014. 120 p. (in Russian)
 14. Nizina T.A., Sel'yanev V.P. Material'naya baza vuza kak innovatsionnyy resurs razvitiya natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta [The material base of the university as an innovative resource for the development of the national research university]. Dolgovechnost' stroitel'nykh materialov, izdeliy i konstruktsiy: materialy vseros. nauch.-tekhn. konf. [Durability of building materials, products and structures: materials of the all-Russian scientific and technical conference]. Saransk, 2014. Pp. 115–121. (in Russian)
 15. Verbitskiy L.N. Prochnost' i dolgovechnost' betona v vodnoy srede [Strength and durability of concrete in an aqueous medium]. Prochnost' i dolgovechnost' betona: sb. nauch. tr. [Strength and durability of concrete: collection of scientific works]. Moscow, Stroyizdat, 1976. Pp. 145–147. (in Russian)
 16. Ivanova O.S., Krilov B.A. Vliyanie nekotorykh tekhnologicheskikh faktorov na prochnost' betona v zamorozhennom sostoyanii [Influence of some technological factors on the strength of concrete in the frozen state]. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 1972. No. 11. Pp. 26–28. (in Russian)
 17. Pirdov K.A. Ischerpanie resursa betona pri temperaturno-vlazhnostnykh i silovykh vozdeystviyakh [Exhaustion of the concrete resource under temperature-humidity and force effects]. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 1997. No. 6. Pp. 26–28. (in Russian)
-

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА



УДК 69.05:658.513

**В.В. ГЕРАСИМОВ, А.В. ИКОННИКОВА, Н.В. СВЕТЫШЕВ,
А.К. ИСАКОВ**

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАНИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Приведено обоснование эффективности использования технологии непрерывного планирования в условиях неопределенности осуществления долгосрочных строительных процессов. Предлагаемый подход основан на использовании технологии кумулятивного интегрирования оценок надежности и риска по периодам планирования комплексного строительного процесса. На основании этого подхода предлагается создать систему организации управления процессами объектов и работ за счет использования нормативов надежности и риска при управлении комплексным строительным процессом. Статья включает результаты исследования технологии стохастического планирования в сфере строительных процессов объектов жилой застройки. Нормативы технологии позволяют создавать центры управления эффективностью, включающие этапы разработки детерминированных планов, нормативов надежности планов, разработки стохастических планов комплексных строительных процессов.

Ключевые слова: организация, потоки, планы, строительство, неопределенность, объект, методика, оценка.

Планирование строительных работ на практике осуществляется в соответствии с нормативами в детерминированном виде. Это снижает достоверность плановых документов и как результат невыполнение объемов и сроков работ. В этих условиях требуется оптимизация работ и ресурсов строительных организаций в планах и прогнозах с учетом вероятностных факторов проведения работ. Задача оптимизации решается известными методами стохастического программирования, при которых вероятностные значения задаются экспертной системой. В этом случае организация ресурсов и работ определяется в расчетном порядке и не обеспечивает достоверности соответствия фактическим параметрам производства. Последние должны учитывать три состояния нормативов: без учета вероятностных факторов, с учетом нормативов вероятностных факторов, с учетом оптимизированных нормативов вероятностных параметров.

© Герасимов В.В., Иконникова А.В., Светышев Н.В., Исаков А.К., 2018

Опыт показывает, что использование плановых документов для строительных работ с учетом стохастических факторов затруднено из-за отсутствия нормативно-методической базы планирования в документах: план строительства, план ресурсов, план механизации, план-бюджет. В составе этих планов формируются организационные модули – кванты, включающие ресурсы и средства для получения результата по вводу объекта [1, 2].

Особенность производства строительных работ обусловлена следующими факторами: большой объем работ, неопределенность оценки при выборе приоритета и структуры объектов и работ, необходимость формирования оптимальной архитектуры потоков объектов, работ и ресурсов в условиях неопределенности и риска. Существующая практика планирования не регламентирует порядок учета надежности как оценки уровня устойчивого получения результата, что снижает достоверность плановых документов. Это становится важной задачей в практике планирования и управления строительными работами [3, 4].

Целью исследования является получение новых знаний и возможностей повышения достоверности плановых решений за счет технологии кумулятивного проектирования надежности ресурсных квантов как технологии последовательного суммирования оценок, распределенных в пространстве комплексных строительных потоков. При этом потоки включают комплекс производственных и строительно-монтажных работ.

Таким образом, становится актуальным разработка надежности организационно-технологических процессов в планах с управлением рисками и оценкой безопасности выполнения работ.

Комплексный строительный процесс представляет собой целенаправленную деятельность множества управлений в распределенном пространстве объектов строительства как множества объектов, субъектов и процессов. Эти объекты характеризуются следующими признаками: объемно-планировочными и конструктивными решениями объектов, разновидностью потоков и планов, различных временных горизонтов [5]. Первым признаком характеризуется исходный набор, которым определяется конфигурация объемов работ и затрат, вторым – масштабирование специализированных группировок работ – квантов, третьим – ресурсная конфигурация реализации потоков.

В основе процессного подхода используются три основные модели процесса: структура потока, структура плана, факторы плана.

Структура процессов отображается моделью вида:

$$КСП = (\cup \Pi_{tко} (\cup \Pi_{tоб} (\cup \Pi_{tсп} (\cup \Pi_{tоп}))))_t, \quad (1)$$

где КСП – комплексный строительный процесс;

$\Pi_{tоб}$ – поток объектов;

$\Pi_{tсп}$ – специализированный поток работ;

$\Pi_{tоп}$ – операционный поток работ;

t – период времени.

Структура планов отображается моделью баланса:

$$КПЛ = \{\cup O(o-p, k) * \cup (P(m, t, \phi))\}, \quad (2)$$

где КПЛ – комплексный строительный план;

О – объект;

о-п, к – соответственно объемно-планировочные и конструктивные решения;

* – индекс операции баланса;

Р – ресурсы;

м, т, ф – соответственно материалы, труд, фонды.

Сбалансированность затрат и продолжительностей в плане осуществляется по элементам структуры потоков и должна обеспечивать рациональное использование потенциала строительной организации – материалов, труда и фондов [6].

Факторы плана включают модель факторов безопасности выполнения плана вида

$$КПЛ(\phi) = \bigcup КПЛ(\phi)_{ijt}, \quad (3)$$

где ϕ_i – фактор риска структуры объекта;

ϕ_j – фактор риска плана объектов.

Из (1)–(3) следует, что моделью структуры потоков отображается динамика распределения потоков разных уровней, моделью плана – динамика объемов и ресурсов, моделью факторов – динамика вероятностей реализации потоков ресурсов.

Комплексом моделей отображаются характеристики: структура комплексного потока; архитектура балансов затрат и продолжительности работ в комплексном потоке; архитектура объектов, потоков, ресурсов в архитектуре комплексного потока.

Из моделей следуют положения:

– ресурсная основа формируется только на уровне операционного потока, а на последующих уровнях – в соответствии с архитектурой лагов процессов;

– ресурсная основа является основой для исследования надежности потоков, поскольку ею определяется уровень использования потенциала потока;

– ресурсная основа потока изменяется во времени и изменяет уровень надежности потока.

Таким образом, комплексный строительный процесс может быть представлен архитектурой потоков объектов, работ, ресурсов и определяется различными трендами затрат во времени с характеристиками неопределенности параметров.

Проблема повышения достоверности плановых решений строительства объектов должна включать решение задач: параметрирование блоков системы объектов; формирование системы опасностей; формирование и оценка системы безопасности планирования объектов [7, 8]. Параметрирование системы планирования основано на координации параметров потока ресурсов с учетом правил оптимизации параметров потоков и трендов планирования; формирование системы опасностей – обеспечивает координацию опасностей и механизма взаимодействия параметров системы; формирование безопасности – интегрированную систему безопасности на основе целенаправленного процесса мониторинга и регулирования отклонениями параметров системы планирования.

Ниже приведен методический подход и результаты исследований по разработке системы безопасности плановых решений жилых объектов на основе использования кумулятивной модели риска в трендах планирования.

Основой подхода являются следующие этапы работ:

- разработка классификации параметров системы планирования объекта строительства;
- разработка классификации опасностей по блокам системы планирования объекта строительства;
- разработка модели оценки и выбора системы безопасности объектов строительства.

Основные задачи планирования представляются моделями вида:

- сбалансированность параметров планов – объектам, работам и ресурсам с параметрами комплексных потоков;
- оптимизация параметров планов на основе распределения квантов по критерию минимизации затрат по времени;
- идентификация надежности параметров планирования на основе моделей вида:

$$Нд = f(m, t, \phi)_t, \quad (4)$$

$$Pк = (1 - Нд), \quad (5)$$

$$\Delta_p Z(Pк)_{tin} = (Z \times Zк)_{tin}, \quad (6)$$

$$\Delta_p T(Pк) = (T \times Pк)_{tin}, \quad (7)$$

$$(\Delta_p Z_t)^* = \{\Delta Z(Pк)^* \Delta T(Pк)\}, \quad (8)$$

где $Нд$ – надежность объекта с учетом внутренних факторов;

m, t, ϕ – индексы материалов, труда, фондов; Δ_p – расчетное отклонение по фактору;

* – индекс комплексного решения;

** – индекс приведения фактора продолжительности к фактору затрат.

Модели (4)–(8) отражают схему использования инструмента надежности по каждому временному лагу и вычисляются кумулятивно для каждого периода времени плана.

Модель реализации плана в условиях внешних факторов неопределенности и риска реализуется на основе технологии непрерывного управления планом и имеет вид:

$$Z(Pк) \geq \Delta_{\phi} \geq Z_{yp} \geq C(Z_p + Z_{yp}), \quad (9)$$

$$\mathcal{E}_{yp1} = [\{Z_p(Pк) + Z(\Delta_{\phi})\} / Z(Pк)] < 1, \quad (+Z_{\phi} \geq Dx), \quad (10)$$

$$\mathcal{E}_{yp2} = [\{Z_p(Pк) + Z_{yp}\} / Z_p(Pк)] > 1, \quad (-Z_{\phi} \geq +Dx), \quad (11)$$

где $Z(Pк)$ – затраты с учетом риска;

Δ_{ϕ} – фактическая величина отклонения затрат;

Z_{yp} – затраты на управление риском;

C – стоимость работ;

$\mathcal{E}_{yp1}, \mathcal{E}_{yp2}$ – соответственно эффективность плана без и с учетом управления риском;

Dx – доход плана реализации процесса.

Модель (9)–(11) отвечает за уровень эффективности управления фактическим риском реализации объектов и определяет области безопасности потоков. При этом с позиции доходности плана значение эффективности менее 1 соответствует опасной зоне, а более 1 – безопасной зоне.

Таким образом, неопределенности параметров в расчетном горизонте плана могут быть представлены дискретными кумулятивными значениями рисков, а в процессе реализации плана – поддерживаться средствами технологии управления планом.

В качестве объектов исследования принимались: комплексный строительный процесс, а предмета – процессы планирования строительства жилых объектов в условиях неопределенности и риска.

Материалом для исследования служили проектные решения типов и видов жилых зданий, организационно-технологические решения документов, планы реализации процессных схем организации строительства, долгосрочные и среднесрочные планы реализации комплексных строительных процессов.

Технология эксперимента включала следующий алгоритм выполнения работ:

- сбор исходных данных по формированию комплексного строительного процесса в формате потоков объектов, работ и ресурсов;
- разработка расчетных модулей планов, соответствующих ресурсным квантам в формате объектов, очередей объектов, комплексов специализированных работ;
- проведение статистических исследований с использованием методов имитационного моделирования с определением вероятностей отклонений по каждому типу кванта с вычислением надежности и риска;
- определение областей организационной безопасности плана.

Проведенные исследования включали следующие результаты:

1. Зависимости изменения вероятности от величины отклонений в формате нормального закона распределения.
2. Нормативы надежности квантов как распределенных ресурсных модулей плана.
3. Рекомендации по использованию нормативов надежности в долгосрочном и среднесрочном планировании.
4. Типовые карты программирования трендов плана и риска.
5. Методики управления внешними рисками в долгосрочном и среднесрочном периоде планирования.

Тренд непрерывной кумулятивной надежности и риска комплексного потока имеет вид:

$$TP : \{3 \times P_k(H_d)\}_{t_i}, \dots, \{3 \times P_k(H_d)\}_{kt_{i+1}}, \quad (12)$$

$$\{3 \times P_k(H_d)\}_{kt_{i+1}} = [\{3 \times P_k(H_d)\}_{t_i} + \{3 \times P(H_d)\}_{t_{i+1}}], \quad (13)$$

где TP – тренд затрат потока;

З – затраты потока;

t_i – i -й период времени потока;

к – индекс кумулятивной надежности и риска.

Моделями (12), (13) отображается кумулятивная схема включения рисков в общий поток затрат потоков.

На основе проведенных исследований определены надежности квантов по всем типам жилых объектов на примере г. Новосибирска (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Расчетные значения риска плана по комплексному потоку жилых объектов города

Поток	Расчетные значения риска				
	Pк1 – риск 1-го варианта	Pк2 – риск 2-го варианта	Pк3 – риск 3-го варианта	Pк4 – риск 4-го варианта	Об – область опасности; норма доходности плана принятая 20 %
Оп – объектный поток плана	0,12	–	–	–	1
Сп – специализированный поток работ плана	–	0,15	–	–	1
ПЭо – поток элементов объекта	–	–	0,19	–	2
Кп – комплексный поток объектов плана	–	–	–	0,24	3

Из табл. 1 следует, что технологией планирования формируется кумулятивная модель риска комплексного плана, которая имеет характеристики:

- последовательного включения риска в динамике тренда квантовых потоков работ;
- возможности оптимизации плановых рисков путем их страхования;
- возможности управления рисками в процессе реализации плана на основе технологии непрерывного планирования и управления внешними рисками.

Таким образом, установленные нормативы надежности и рисков модулей плана могут быть использованы при разработке планов для учета внутренних факторов, а учет внешних факторов может быть осуществлен в рамках методологии проектного управления реализацией плана.

Эффект от применения подхода может быть представлен тремя эффектами [9]:

$$O_n = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 , \quad (14)$$

где O_n – интегрированная оценка эффективности технологии планирования комплексных потоков;

\mathcal{E}_1 – эффект повышения достоверности планируемых решений от возможности нормирования неопределенности на основе определенного кумулятивного риска от внутренних факторов и риском внешних факторов;

\mathcal{E}_2 – эффект от возможности регулирования уровня безопасности процессов и структур комплексных процессов с учетом различных методов страхования;

Таблица 2. Оценка технико-экономической безопасности комплексных строительных процессов

Факторы снижения риска	Эффективность потоков			
	Оп	Сп	ПЭо	Кп
Нормирование кумулятивного риска плана	1,1	1,12	1,14	1,21
Оптимизация риска по схемам страхования	1,03	1,04	1,05	1,07
Управление отклонениями при реализации процессов	1,05	1,05	1,05	1,05
Итого эффект от сокращения затрат на управление неопределенностью и риском	1,18	1,21	1,24	1,33

Примечание. Эффективность определена долей затрат и эффектов от мероприятий.

\mathcal{E}_3 – эффект за счет возможности управления отклонениями параметров плана в процессе реализации.

Оценка технико-экономической безопасности комплексных строительных процессов приведена в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что уровень эффективности управления риском с использованием специальных мероприятий по разным формам организации строительных процессов имеет различные значения эффективности и может быть использован в практике планирования. Таким образом, использование технологии кумулятивного нормирования надежностей и рисков объектов планирования в условиях неопределенности позволяет за счет повышения достоверности проектирования опасностей повысить уровень безопасности планирования и получить экономические эффекты от сокращения непроизводительных затрат [9].

Выводы. 1. Методическая база планирования строительных объектов еще недостаточно полно разработана по направлению формирования и управления факторами неопределенности и риска, что снижает достоверность принимаемых решений в долгосрочных и среднесрочных планах работ.

2. Предложенный подход предусматривает технологию планирования, основанную на разработке нормативов надежности и риска в двух направлениях: на базе внутренних факторов, которые определяются количественными значениями кумулятивного риска, и на базе внешних факторов, которые определяются технологией непрерывного планирования и управления.

3. Использование подхода позволяет формировать нормативную базу типовых модулей строительных работ и использовать их для формирования автоматизированной системы управления комплексных строительных потоков жилой застройки города с учетом факторов неопределенности и риска.

Полученные в исследовании нормативы и методические инструменты управления по технологии планирования в условиях неопределенности и риска позволяют формировать модульные системы организации и технологии строительных процессов и использовать их в планировании и управлении для выполнения функций воспроизводства жилого фонда.

В качестве развития нормативной базы инструментов планирования должны быть разработаны технические условия, технологические и органи-

зационные карты процессов с учетом нормативов надежности, риска и неопределенности выполнения работ.

Методическая база инструментов планирования должна включать методики стохастического прогнозирования, планирования и управления программами работ организаций на краткосрочную и долгосрочную перспективу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rogers C.R. Freedom to learn: A view of what education might become. Columbus (Ohio), 1969. P. 158.
2. Creen T.F. Schools and communionalies: Harvard Educational Review. 1969. Vol. 39. No. 2. P. 236–237.
3. Герасимов В.В., Коробова О.А., Михальченко О.Ю. Основы интегрированной безопасности строительных систем // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 2. С. 48–56.
4. Швездов В.А. Организационно-технологические условия и факторы управления региональным комплексом инвестиционно-зависимых отраслей // Изв. КГАСУ. 2005. № 1 (3). С. 98–101.
5. Магомедов А.Г. и др. Проблемы теории и практики формирования эффективной системы управления строительным производством на базе научно-технического прогресса. М.: Эконом, 2012. 112 с.
6. Симонова Н.Е., Ткачева М.А. Совершенствование системы оценки эффективности управления на разных фазах жизненного цикла строительного предприятия. Ростов-н/Д: РГСУ, 2012. 181 с.
7. Герасимов В.В., Минина Л.С. Интегрированное проектирование объектов жилищного строительства: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. архит.-строит. ун-та (Сибстрин), 2001. 194 с.
8. Герасимов В.В., Саломатин Е.А., Пятых Н.В. Управление программными рисками территориальных систем // Новые технологии в строительном материаловедении: междунар. сб. науч. тр. Новосибирск: НГАУ, 2012. С. 156–161.
9. Социально-экономический потенциал региона: проблемы оценки, использования и управления / под ред. А.И. Татаркина. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 213 с.

Герасимов Виталий Владимирович, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: gvv2050@yandex.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Иконникова Альбина Викторовна, канд. экон. наук, доц.;

E-mail: 13foxx@mail.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Светышев Назар Владиславович, асп.; E-mail: nazarsvetyshev@mail.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Исаков Алексей Константинович, канд. экон. наук, доц.

Сургутский государственный университет

Получено после доработки 19.02.18

Gerasimov Vitaliy Vladimirovich, DSc, Professor; E-mail: gvv2050@yandex.ru

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

Ikonnikova Al'bina Viktorovna, PhD, Ass. Professor; E-mail: 13foxx@mail.ru

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

Svetyshev Nazar Vladislavovich, Post-graduate Student;

E-mail: nazarsvetyshev@mail.ru

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Isakov Aleksey Konstantinovich, PhD, Ass. Professor
Surgut State University, Russia

TECHNOLOGY RESEARCH PLANNING OF COMPLEX CONSTRUCTION PROCESSES IN CONDITIONS OF UNCERTAINTY

Justification of efficiency of use of technology of continuous planning in the conditions of uncertainty of implementation of long-term construction processes is given in article. The offered approach is based on use of technology of cumulative integration of estimates of reliability and risk on the periods of planning of complex construction process. On the basis of this approach it is offered to create the system of the organization of management of processes of objects and works due to use of standards of reliability and risk at management of complex construction process. Article includes results of a research of technology of stochastic planning in the sphere of construction processes of objects of the housing estate. Standards of technology allow to create control centers of efficiency, including stages: development of the determined plans, development of standards of reliability of plans, development of stochastic plans of complex construction processes.

K e y w o r d s: organization, streams, plans, construction, uncertainty, object, technique, assessment.

REFERENCES

1. Rogers C.R. Freedom to learn: A view of what education might become. Columbus (Ohio), 1969. P. 158.
2. Creen T.F. Schools and communionalies: Harvard Educational Review. 1969. Vol. 39. No. 2. Pp. 236–237.
3. Gerasimov V.V., Korobova O.A., Mikhalkchenko O.Yu. Osnovy integrirovannoy bezopasnosti stroitel'nykh sistem [Fundamentals of Integrated Safety of Building Systems]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2012. No. 2. Pp. 48–56. (in Russian)
4. Shvetsov V.A. Organizational-technological usloviya i factory upravleniya regional'nym kompleksom investitsionno-zavisimykh otrassley [Organizational and technological conditions and management factors of a regional complex of investment-dependent industries]. Izvestiya KGASU [News of KSUAE]. 2005. No. 1 (3). Pp. 98–101. (in Russian)
5. Magomedov A.G. and others. Problemy teorii i praktiki formirovaniya effektivnoy sistemy upravleniya stroitel'nym proizvodstvom na baze nauchno-tehnicheskogo progressa [Problems of theory and practice of forming an effective system for managing construction production on the basis of scientific and technological progress]. Moscow, Econom, 2012. 112 p. (in Russian)
6. Simionova N.E., Tkacheva M.A. Sovershenstvovanie sistemy otsenki effektivnosti upravleniya na raznykh fazakh zhiznennogo tsikla stroitel'nogo predpriyatiya [Perfection of the system for assessing the effectiveness of management at different phases of the life cycle of a construction enterprise]. Rostov-on-Don, RGSU, 2012. 181 p. (in Russian)
7. Gerasimov V.V., Minina L.S. Integrirovannoe proektirovanie ob'ektov zhilishchnogo stroitel'stva: uchebnoe posobie [Integrated design of residential buildings: textbook]. Novosibirsk, Publishing house NSUACE (Sibstrin), 2001. 194 p. (in Russian)

8. Gerasimov V.V., Salomatina E.A., Pyatikh N.V. Upravlenie programmnymi riskami territorial'nykh system [Management of program risks of territorial systems]. Novye tekhnologii v stroitel'nom materialovedenii: mezhdunar. sb. nauch. trudov [New Technologies in Building Materials Science]. Novosibirsk, NSUACE, 2012. Pp. 156–161. (in Russian)
 9. Sotsial'no-ekonomicheskiy potentsial regiona: problemy otsenki, ispol'zovaniya i upravleniya [Socio-economic potential of the region: problems of evaluation, use and management]. Ed. A.I. Tatarkin. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2004. 213 p. (in Russian)
-

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ, ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКОЛОГИИ



УДК 726.1(510).001.572

ЧЖАН ГУАНЬИН

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИБЛИОТЕКИ ЭЛЕМЕНТОВ ДОУГУН ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДАДЯНЯ ХРАМА БАОГОСЫ В КИТАЕ

Представлены результаты предварительного исследования и последующего информационного моделирования Дадяня (основного здания) храма Баогосы, являющегося памятником деревянного зодчества Древнего Китая. Информационное моделирование велось на основе созданной автором и адаптированной для конкретной работы компьютерной библиотеки элементов системы доугун. В дальнейшем построенная модель может использоваться для структурированного накопления, исследования, использования и хранения информации об указанном памятнике архитектуры, а также для мониторинга его состояния и эксплуатации.

Ключевые слова: информационное моделирование, BIM, деревянное зодчество, доугун, Древний Китай, Дадянь, Баогосы.

Введение. Эта работа представляет результат применения технологии BIM [1, 2] при создании информационной модели [3] дошедшего до нас храма Баогосы – памятника деревянного зодчества Древнего Китая, вернее, его Дадяня (основного здания). В наибольшей степени моделирование велось на основе разработанной автором компьютерной библиотеки элементов системы доугун (основы китайского деревянного зодчества), описанной в монографии [4]. Эта библиотека элементов создавалась по канонам трактата «Инцзаофаши» («Образцы строительства») [5], определявшего в Китае правила использования системы доугун при возведении зданий и сооружений [6], так что работу [4] можно в определенной степени считать попыткой пересказа на русский язык основных положений этого трактата. Там же даны пояснения к параметрам и виду основных элементов, а также приведен достаточно подробный словарь терминов, связанных с системой доугун, использование которого облегчит читателям знакомство с настоящей публикацией.

Краткая история храма Баогосы. Первый храм Баогосы (Храм служения Родине) именовался «Линшаньсы» (название указывает, что он находится в горах Линшань) и был построен в эпоху династии Тан (618 – 907 гг.), но в 845 г. он подвергся полному разрушению. Вновь храм был выстроен в 880–881 гг. и назван дошедшим до наших дней именем Баогосы.

В эпоху Сун (960 – 1279 гг.), когда на юге Китая бурно развивался буддизм, храм Баогосы получил серьезное развитие. Дадянь (основное здание

© Чжан Гуаньин, 2018

храма) был построен в 1013 г. и сохранился до наших дней. В дальнейшем храм Баогосы претерпел несколько ремонтов и расширений. В частности, были построены здания: в 1020 г. – Фанчжандянь (место проведения крупных обрядов моления), в 1032 г. – Чаоюань (здесь встречаются с небожителем или святым человеком), в 1041–1048 гг. – Цутан (храм предков), после чего храм Баогосы стал сформировавшимся комплексом зданий.

После реконструкции 1684 г. храм Баогосы сильно изменил свой внешний вид. Ранее существовавший Дадянь, представлявший здание длиной и шириной в три помещения с одноярусной девятиребристой крышей, получил новую длину и ширину в пять помещений с двухъярусной крышей. Однако сунская структура храма Баогосы в этот период осталась практически без изменений. В дальнейшем сильный ущерб храмовому комплексу нанес пожар 1910 г., но к 1914 г. было завершено его восстановление.

Особенности Дадянь храма Баогосы и требования трактата «Инцзаофashi». Система доугун – основа деревянного зодчества Древнего Китая, она использовалась и при возведении сооружений храма Баогосы. Однако, как уже отмечалось, Дадянь храма Баогосы был построен в 1013 г., а трактат «Инцзаофashi», вобравший в себя многовековой опыт и определявший правила применения доугун, появился лишь в 1103 г. Таким образом, Дадянь был построен на 90 лет раньше упомянутого трактата. Но изготовление элементов конструкций и само строительство в основном велось по правилам, указанным в «Инцзаофashi», хотя какие-то расхождения, конечно, были. Перечислим основные соответствия трактату «Инцзаофashi», которые проявились при проектировании и возведении Дадяня храма Баогосы:

1. Основные параметры цай и це: размер цая для доугун – $21,5 \times 14,5$ см, отношение высоты и ширины цая равняется 3:2,02; согласно же трактату высота цая составляет 15 фэней, ширина цая – 10 фэней, т.е. их отношение должно быть 3:2.

2. Колонны: в Дадянь имеется 16 комбинированных колонн, их сечения составляют восьмигранные лепестковые формы, внешний максимальный диаметр колонны – 56 см, внутренний – 62 см, что соответствует цай в 39,2 и 43,4 фэней. Это практически совпадает с правилом изготовления колонн в «Инцзаофashi», когда диаметр колонны равняется 42 фэням.

3. Каркас здания имеет 16 колонн, в том числе четыре внутренних, их два поперечных и два продольных ряда составляют несовершенную симметричную композицию.

4. Элемент чомуфан имеет особый вид. Он находится под ланье и между передними колоннами. Его форма похожа на форму «Чаньду чому», указанную в «Инцзаофashi».

5. Лудоу в чжуютоу (доугун на колонне) и чжуаньцао пуззо (доугун на угловой колонне) представляют собой круглый доу с лепестком, а лудоу в бузянь пуззо (доугун на балке) является квадратным доу, что также соответствует «Инцзаофashi».

6. Длина шуатоу 34,5 см (примерно 23,96 фэней), что также приближается к правилам «Инцзаофashi».

7. Размер доугуна для цаоцзин – $17 \times 11,5$ см, высота це – 7 см, что меньше размера доугуна самого Дадянь.

8. Выступ карниза равняется 130 см в полном соответствии с правилами «Инцзаофаши».

Дадянь храма Баогосы имеет много и других особенностей как использующейся системы доугун, так и построения здания вообще. В целом все это вписывается в основные правила возведения храмовых сооружений, принятые в Древнем Китае в эпоху Сун. Однако моделирование указанного сооружения потребовало как специального изучения индивидуальных особенностей памятника архитектуры, так и разработки дополнительных методик моделирования и адаптации компьютерной библиотеки элементов доугун [7] под измененные формы и параметры.

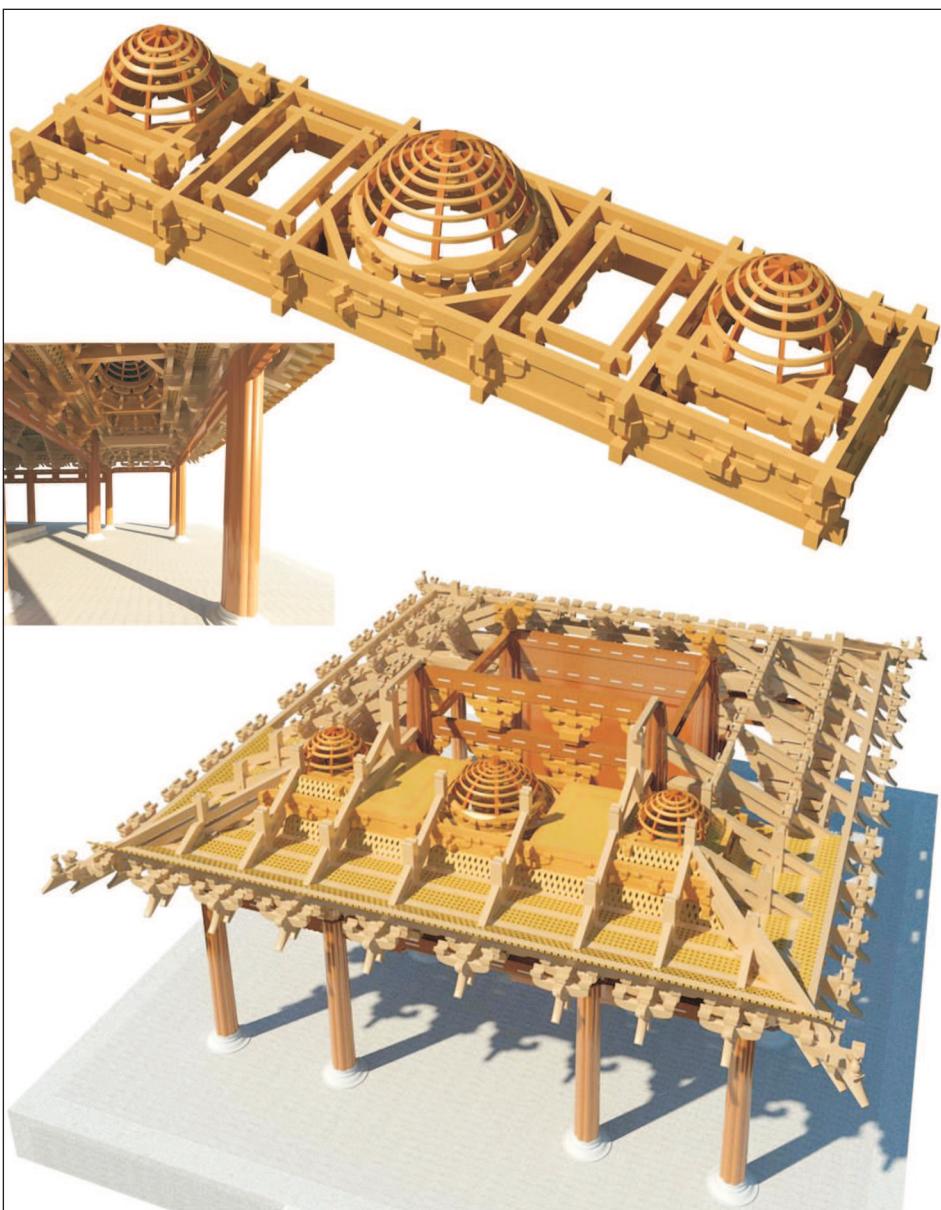


Рис. 1. Заоцин – купольная, квадратная или многогранная часть в потолке внутреннего помещения для его украшения

Моделирование Дадяня храма Баогосы. Как уже отмечалось, моделирование Дадяня храма Баогосы велось на основе созданной ранее автором библиотеки элементов системы доугун в программе Autodesk Revit. Поскольку информационное моделирование зданий – технология объектно-ориентированная [3], то процесс построения модели Дадяня разделялся на создание необходимых самостоятельных элементов здания (как относящихся к системе доугун, так и представляющих другие компоненты: колонны, ступеньки, ограждения, двери и т.п.) и сборку этих элементов (с необходимыми значениями параметров построения и вставки) в объединенную модель. Общая методика создания составляющих элементов и их использование в единой модели подробно описаны в работе [7], поэтому здесь рассматриваться не будут.

Однако моделирование Дадяня храма Баогосы имело и весьма серьезные особенности, которые следует указать отдельно. Прежде всего, при осуществлении этой работы можно выделить три основных смысловых этапа, имевших самостоятельное значение, но реализовывавшихся почти параллельно и геометрически взаимосвязанно.

Этап 1. Моделирование общих элементов здания и прилегающей территории, не относящихся к системе доугун. Как уже отмечалось, такая работа при моделировании памятника архитектуры выполняется всегда, но в нашем случае она отличалась немалым объемом и сложностью. Прежде всего стоит отметить трехкупольную конструкцию Доуба Заоцзин (рис. 1), сравнительно часто применявшуюся в деревянных храмах Древнего Китая, но в этом сооружении представляющую уникальную комбинацию специальных деревянных элементов. В Древнем Китае обычно использовалась в храме или монастыре и устанавливалась над алтарем. Фактически для ее добавления в модель Дадяня храма Баогосы была создана библиотека элементов, имеющая самостоятельное значение и применимая для моделирования других памятников деревянного зодчества Древнего Китая, содержащих похожие купольные конструкции.

Этап 2. Адаптация созданных ранее библиотечных элементов доугун к особенностям храма Баогосы. Как уже отмечалось, система доугун храма

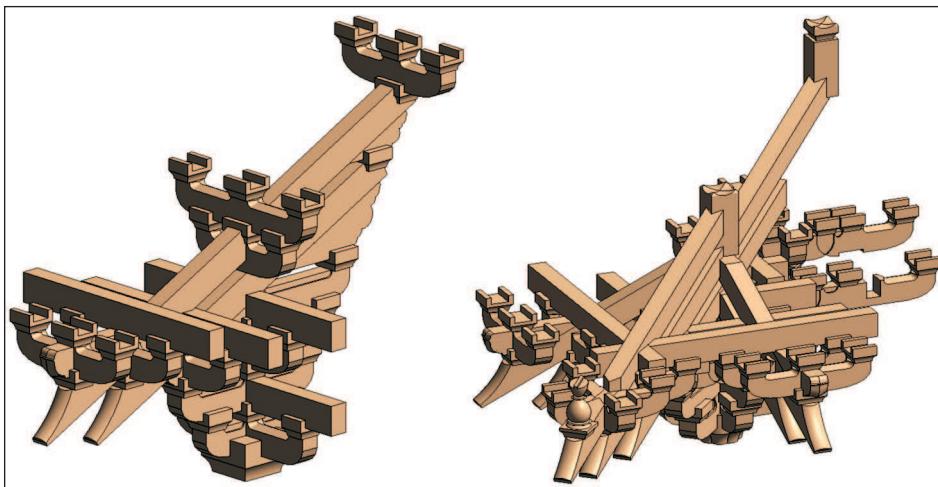


Рис. 2. Элементы доугун на восточных балках и южных угловых колоннах Дадяня храма Баогосы

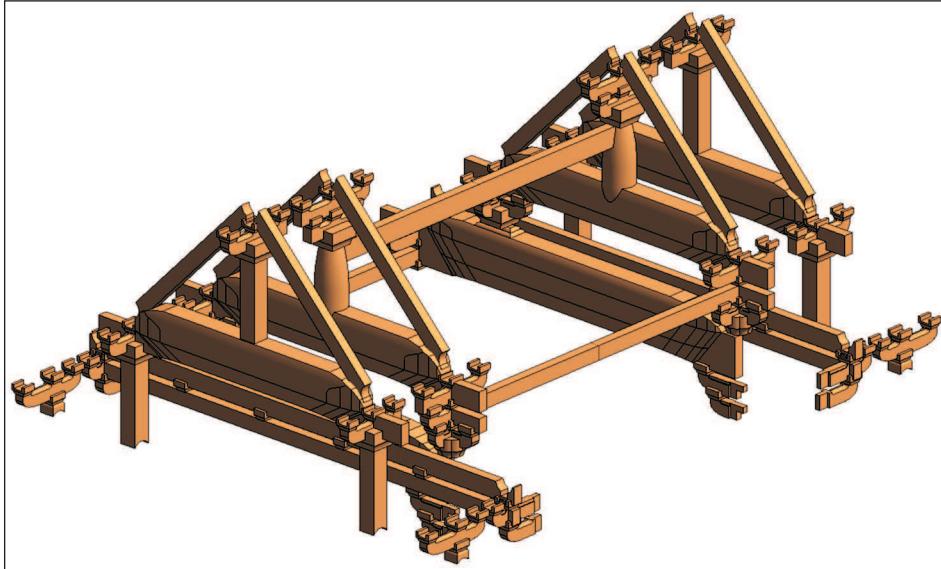


Рис. 3. Дадянь храма Баогосы: каркас крыши. После реконструкции в династии Цин (1644 – 1911 гг.) под имеющейся крышей была добавлена еще одна, после чего крыша Дадяня стала двухъярусной



Рис. 4. Дадянь храма Баогосы: разные виды и разрезы построенной модели

Баогосы создавалась за 90 лет до появления трактата «Инцзаофаши» [5]. Поэтому хотя в основном она соответствовала описанным в трактате канонам, расхождения с «Инцзаофаши» все же были (рис. 2). Прежде всего это относится к изменениям значений параметров цай и цэ [7], но поскольку китайские зодчие при возведении храмов всегда проявляли свой индивидуальный «почерк», фактически проверке и необходимой корректировке подвергались все используемые из созданных ранее библиотечных элементов системы доугун. Однако это вполне укладывается в общую концепцию моделирования памятников деревянного зодчества Древнего Китая и вообще буддийского Востока на основе библиотеки элементов доугун [8].

Этап 3. Использование созданных и адаптированных элементов при построении общей модели здания. Это касается основной части каркаса Дадяня храма Баогосы (рис. 3) и итоговой модели здания (рис. 4). Такая работа потребовала как серьезного анализа общей схемы построения сооружения, так и проработанной для каждого конкретного объекта методики комплексного моделирования.

Полученную в результате проделанной работы модель Дадяня храма Баогосы можно отнести к основной геометрически информационной части

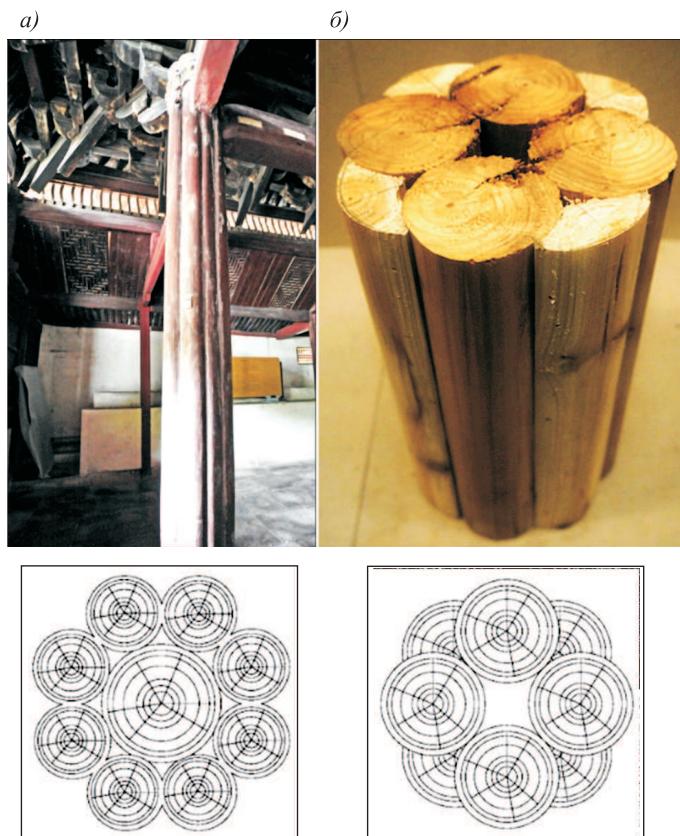


Рис. 5. Восьмигранная лепестковая комбинированная колонна имеет два типа

a – в центре круглый элемент, вокруг него восемь более узких; б – четыре круглых бревна соединены с четырьмя дугообразными элементами способом «шип–паз»

общей информационной модели памятника архитектуры [9], которая затем пригодна для наполнения всевозможными данными по сооружению и его составным элементам. Например, по деревянной структуре колонн здания (рис. 5), представляющей для памятника деревянной архитектуры особое значение, но не передаваемой простым трехмерным моделированием.

В дальнейшем построенная модель может применяться для структурированного накопления, исследования, использования и хранения информации об указанном памятнике архитектуры [9], а также для мониторинга его состояния [10, 11] и даже эксплуатации [12, 13].

Автор выражает глубокую благодарность В.В. Талапову за руководство работой, а также компании Autodesk за бесплатно предоставленное программное обеспечение, в котором проводилось моделирование.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Талапов В.В. Основы BIM: введение в информационное моделирование зданий. М.: ДМК-пресс, 2011. 391 с.
2. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM Handbook. Second edition. N.J.: Wiley, 2011. 626 с.
3. Талапов В.В. Технология BIM: суть и основы внедрения информационного моделирования зданий. М.: ДМК-пресс, 2015. 410 с.
4. Талапов В.В., Чжан Гуаньин. Информационное моделирование памятников архитектуры на примере древнекитайской системы доугун. Новосибирск: НГУАДИ, 2016. 183 с.
5. Ли Цзэ. «Инцзаофаши» («Образцы строительства») // Династия Сун. 1103 г. (на кит. яз.).
6. Чжан Гуаньин. Опыт информационного моделирования беседок-памятников архитектуры Древнего Китая // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 4(688). С. 95–100.
7. Чжан Гуаньин. Библиотека элементов доугун и информационное моделирование памятников архитектуры Древнего Китая // Междунар. электронный науч.-образоват. журн. «AMIT». 2015. Вып. 2(31). URL: <http://www.marhi.ru/AMIT/2015/2kvert15/chzan/chzan.pdf>
8. Майничева А.Ю., Талапов В.В., Чжан Гуаньин. Принципы информационного моделирования недвижимых объектов культурного наследия (на примере деревянных буддийских храмов) // Археология, этнография и антропология Евразии. 2017. Т. 45. № 2. С. 142–148.
9. Талапов В.В. О некоторых закономерностях и особенностях информационного моделирования памятников архитектуры // Междунар. электронный науч.-образоват. журн. «AMIT». 2015. Вып. 2(31). URL: <http://www.marhi.ru/AMIT/2015/2kvert15/talapov/abstract.php>
10. Козлова Т.И. Информационная модель недвижимого объекта культурного наследия как новый инструмент работы в музеефикационной практике // Вестн. Том. гос. ун-та. История. 2013. № 3(23). С. 33–37.
11. Майничева А.Ю., Талапов В.В., Куликова С.О. Новый подход к сохранению памятников русского деревянного зодчества: применение технологии BIM // Урал. ист. вестн. 2018. № 1(58). С. 136–141.
12. Jernigan F. BIG BIM little bim. Second edition. Salisbury: 4 Site Press, 2008. 198 p.
13. Krygiel E., Niec B. Green BIM: Successful Sustainable Design with Building Information Modeling. N. J.: Wiley, 2008. 310 p.

Чжан Гуаньин, асп.; E-mail: clava19890602@qq.com

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 15.02.18

Zhang Guanying, Post-graduate Student; E-mail: clava19890602@qq.com

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

USING THE LIBRARY ELEMENTS DOUGONG FOR MODELING DALIAN BAOGUOSI TEMPLE IN CHINA

The article presents the results of a preliminary survey and information modeling of Dalian of Baoguosi temple, is a monument of wooden architecture of Ancient China. Information modeling was carried out on the basis of the computer library of elements of the dougong system created by the author and adapted for this work. Further the constructed model can be used for the structured accumulation, research, use and storage of information on the specified monument of architecture, and also for monitoring of its condition and operation.

K e y w o r d s: information modeling, BIM, wooden architecture, Dougong, Ancient China, Dalian, Baoguosi.

REFERENCES

1. T a l a p o v V.V. Osnovy BIM: vvedenie v informatsionnoe modelirovaniye zdaniy [Basic BIM: Introduction into building informational modeling]. Moscow, DMK-press, 2011. 391 p. (in Russian)
2. E a s t m a n C., T e i c h o l z P., S a c k s R., L i s t o n K. BIM Handbook. Second edition. N.J., Wiley, 2011. 626 p.
3. T a l a p o v V.V. Tekhnologiya BIM: sut' i osnovy vnedreniya informatsionnogo modelirovaniya zdaniy [BIM technology: the essence and basics of implementing information modeling of buildings]. Moscow, DMK-press, 2015. 410 p. (in Russian)
4. T a l a p o v V.V., Z h a n g G u a n y i n g. Informatsionnoe modelirovaniye pamyatnikov arkhitektury na primere drevnekitayskoy sistemy dougun [Information modeling of architectural monuments on the example of the ancient Chinese dougun system]. Novosibirsk, NGUADI, 2016. 183 p. (in Russian)
5. L i T s z e. Yíngzao Fashì [Samples of construction]. China. 1103 (in China).
6. Z h a n g G u a n y i n g. Opyt informatsionnogo modelirovaniya besedok-pamyatnikov arkhitektury Drevnego Kitaya [Experience of information modeling of arbors – monuments of Ancient China]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 4(688). Pp. 95–100. (in Russian)
7. Z h a n g G u a n y i n g. Biblioteka elementov dougun i informatsionnoe modelirovaniye pamyatnikov arkhitektury Drevnego Kitaya [Library of dougong elements and information modeling of monuments of Ancient China]. AMIT [AMIT]. 2015. Fasc. 2 (31). Available at: <http://www.marhi.ru/AMIT/2015/2kvart15/chzan/chzan.pdf> (in Russian)
8. M a y n i c h e v a A.Yu., T a l a p o v V.V., Z h a n g G u a n y i n g. Printsipy informatsionnogo modelirovaniya nedvizhimykh ob'ektov kul'turnogo naslediya (na primere derevyannykh buddiyskikh khramov) [Principles of the information modeling of cultural legacy objects: The case of wooden Buddhist temples]. Arkheologiya, etnografiya i antropologiya Evrazii [Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia]. 2017. Vol. 45. No. 2. Pp. 142–148. (in Russian)

9. T a l a p o v V.V. O nekotorykh zakonomernostyakh i osobennostyakh informatsionnogo modelirovaniya pamyatnikov arkhitektury [On some regularities and features of information modeling of architectural monuments]. AMIT [AMIT]. 2015. Fasc. 2 (31). Available at: <http://www.marhi.ru/AMIT/2015/2kvart15/talapov/abstract.php>. (in Russian)
 10. K o z l o v a T.I. Informatsionnaya model' nedvizhimogo ob'ekta kul'turnogo naslediya kak novyy instrument raboty v muzeefikatsionnoy praktike [The information model of a real object of cultural heritage as a new tool to work museumification practice]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Istorya [Tomsk State University Journal of History]. 2013. No. 3(23). Pp. 33–37. (in Russian)
 11. M a y n i c h e v a A.Yu., T a l a p o v V.V., K u l i k o v a S.O. Novyy podkhod k sokhraneniyu pamyatnikov russkogo derevyannogo zodchestva: primenenie tekhnologii BIM [A new approach to preservation of monuments of Russian wooden architecture: the use of BIM technology]. Ural'skiy istoricheskiy vestnik [Ural historical Bulletin]. 2018. No. 1(58). Pp. 136–141. (in Russian)
 12. J e r n i g a n F. BIG BIM little bim. Second edition. Salisbury, 4 Site Press, 2008. 198 p.
 13. K r y g i e l E., N i e c B. Green BIM: Successful Sustainable Design with Building Information Modeling. N.J., Wiley, 2008. 310 p.
-

УДК 72:631.234

А.А. БЛАЖНОВ

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТИПОВ ЗИМНИХ ТЕПЛИЦ ДЛЯ ФЕРМЕРСКИХ ХОЗЯЙСТВ

Рассматривались предлагаемые рынком теплицы круглогодового использования для фермерских хозяйств: многопролетные, ангарные рамные и арочные. Установлено влияние типа теплицы на теплопотери сооружения. Получены формулы коэффициента ограждения для теплиц различной конструктивной формы, позволяющие определить их энергоэкономичные объемно-планировочные параметры. Определена сравнительная эффективность вариантов ограждающих светопрозрачных конструкций теплиц. Предложена конструктивная схема ангарной рамной теплицы построенного изготовления из прокатных профилей, строительные решения которой позволяют минимизировать единовременные затраты и эксплуатационные расходы. Выведены зависимости удельного расхода стали на элементы каркаса теплицы и оптимизированы его конструктивные параметры.

Ключевые слова: типы теплиц, энергосберегающие строительные решения, оптимизация каркаса теплицы.

Для фермерских хозяйств рядом заводовлагаются строительные конструкции нескольких типов теплиц круглогодового использования (рис. 1), отличающиеся решениями каркаса и ограждения [1, 2]. Культуривационные сооружения с различными конструктивными схемами должны отличаться материалоемкостью и эксплуатационными качествами. В связи с этим устанавливается влияние приведенных типов фермерских теплиц на расходы материалов на несущие и ограждающие конструкции и отопление. Также подготовлены предложения по строительным решениям фермерской теплицы построенного изготовления, примерно в три раза снижающим затраты на ее возведение. Оптимальные значения строительных параметров теплиц находились аналитическим методом, т.е. исследованием на экстремум выведенных математических выражений.

Сравнение теплопотерь и расхода материалов на светопрозрачные конструкции при оценке теплиц различных типов может быть выполнено на основе анализа коэффициента ограждения, представляющего собой отношение площади ограждающих конструкций к площади теплицы.

Так, для ангарной рамной равноскатной теплицы (рис. 1, б) коэффициент ограждения

$$K_{\text{огр}} = \frac{2h}{L} + \frac{1}{\cos\alpha} + \frac{2h}{A} + \frac{L}{2A} \operatorname{tg}\alpha, \quad (1)$$

где h – высота продольного светопрозрачного ограждения (в соответствии с СП 107.13330.2012 «Теплицы и парники» для ангарных теплиц минимально равная 1,5 м);

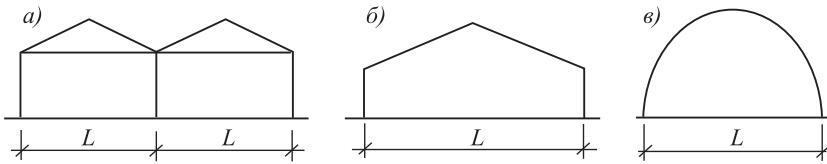


Рис. 1. Основные типы выпускаемых фермерских теплиц
 а – блочная (многопролетная); б – ангарная рамной конструктивной схемы;
 в – арочная

L и A – соответственно пролет и длина теплицы ($A = F/L$, где F – принятая площадь теплицы);

α – угол наклона скатов кровли (не менее 45 % (25°) по СП 107.13330.2012).

Заменив A в формуле (1) и продифференцировав выражение по L , после преобразований получим кубическое уравнение, из которого после подстановки h и $\operatorname{tg}\alpha$ несложно подбором определить пролет теплицы, соответствующий минимуму коэффициента ограждения:

$$\frac{L^3 \operatorname{tg}\alpha}{F} + \frac{2hL^2}{F} - 2h = 0. \quad (2)$$

Для блочной n -пролетной теплицы (рис. 1, а) количество пролетов, соответствующее минимальной площади ограждающих конструкций:

$$n = \frac{2}{L} \sqrt{\frac{hF_n}{4h + Lt\operatorname{tg}\alpha}}, \quad (3)$$

где L – пролет теплицы, м (в соответствии с СП 107.13330.2012 не должен превышать 9 м);

h – высота продольного ограждения, м (для блочных теплиц минимально равная 2,1 м по СП 107.13330.2012);

α – угол наклона скатов кровли (не менее 25°);

F_n – предусматриваемая площадь теплицы, м^2 .

Задаваясь технологически приемлемым пролетом L , по формуле (3) определим n , а следовательно, и планировочные размеры блочной теплицы принятой площади, при которой коэффициент ограждения будет минимальным:

$$K_{\text{огр}}^{\min} = \frac{Lt\operatorname{tg}\alpha}{2A} + \frac{2h}{nL} + \frac{2h}{A} + \frac{1}{\cos\alpha}, \quad (4)$$

где A – длина теплицы, м.

У ангарной теплицы с арочной круговой формой покрытия (рис.1, в) коэффициент ограждения (5) не имеет минимума и с увеличением пролета непрерывно возрастает (пролет L принят равным диаметру окружности)

$$K_{\text{огр}} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{L^2}{2F} + 1 \right). \quad (5)$$

Нормы технологического проектирования теплиц НТП 10–95 рекомендуют принимать минимальную площадь теплиц круглогодового использования для фермерских хозяйств равной 300 м². По расчетам для более быстрой окупаемости эта площадь должна составлять 500 м² [1]. Применительно к этой площади застройки установлено влияние типа теплицы на коэффициент ограждения сооружения (рис. 2).

Из приведенных графиков следует, что при равной площади застройки тепловые потери и расход материалов на светопрозрачное ограждение ангарных теплиц при оптимальном пролете будут несколько меньшими (на 2–15 %), чем у других типов сооружений. По результатам исследований и данным заводов-изготовителей расход стали на несущие конструкции оказывается меньшим для арочных теплиц – 5–7 кг/м², для блочных и ангарных рамных этот показатель в зависимости от сугревого района, типа профилей и конструкции каркаса изменяется в пределах 6–11 кг/м² [1].

Рациональный выбор геометрических параметров формы ангарных теплиц (по СП 107.13330.2012 уклон прямолинейных скатов не менее 45 %, криволинейных – 20 %) позволяет исключить снегонакопление на покрытии. Так, многолетний опыт эксплуатации ангарной теплицы финской поставки пролетом 18 м с покрытием и боковым ограждением из сотовых панелей в экспериментальном тепличном хозяйстве института «Гипронисельпром» (г. Орел) показал, что снег на покрытии сооружения не накапливается. В блочных теплицах возможно образование снеговых мешков в ендовах с последующим разрушением кровли. Следует также отметить, что еще полвека назад проведенные в Англии¹, Австрии² и ФРГ³ исследования показали, что в ангарных теплицах пролетом 9–18 м показатели освещенности, горизонтального и вертикального распределения температур, урожайности лучше, чем в блочных теплицах.

Светопрозрачные конструкции теплиц выполняются из стекла (одинарное и двойное остекление), стеклопакетов (в вертикальном ограждении), сотовых поликарбонатных листов. Обобщение технико-экономических показателей указанных материалов и изделий [1, 3–8] показало, что меньшая стоимость на единицу термического сопротивления соответствует ограждению из поликарбонатных листов.

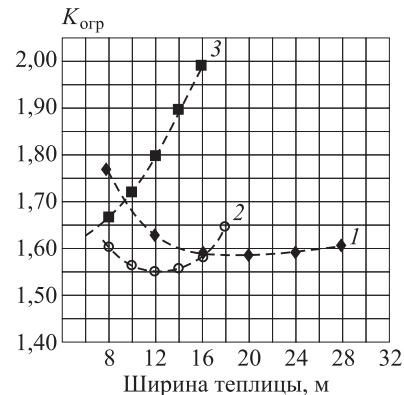


Рис. 2. Изменение коэффициента ограждения теплицы площадью 500 м²

1 – блочная теплица ($h = 2,1 \text{ м}; L = 4 \text{ м}; \alpha = 30^\circ$); 2 – ангарная рамная теплица ($h = 1,5 \text{ м}; \alpha = 30^\circ$); 3 – ангарная арочная теплица

¹ Rodger-Brown J. Wide-span glasshouses. Farmbuilding. 1967. No. 16.

² Wohlmuth N. Das Gewachshaus und seine Bauelemente. Gartenbauwirtschaft. 1965. No. 12.

³ Bohn R. Gewachshausbau in eigener Regie. Gartenwelt. 1966. No. 5.

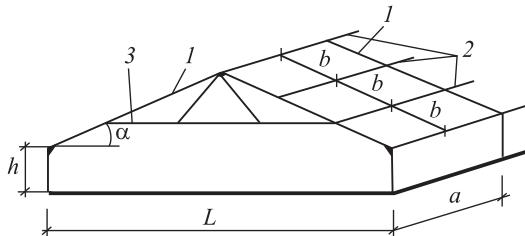


Рис. 3. Конструктивная схема теплицы
1 – сплошная рама из швеллеров; 2 – прогоны из гнутых или прокатных профилей; 3 – затяжка

Значительно сократить затраты на строительство возможно при изготовлении каркаса теплицы в фермерском хозяйстве из прокатных профилей с узловыми соединениями на сварке. Рассматривалась конструктивная схема ангарной рамной теплицы (рис. 3), характеризуемая меньшим коэффициентом ограждения по отношению к другим типам теплиц. Площадь теплицы принималась равной 500 м², ранее установленный оптимальный пролет сооружения $L = 12$ м (см. рис. 2).

Для определения оптимальных строительных параметров каркаса устанавливались закономерности изменения расхода металла на основные конструктивные элементы теплицы (прогоны, рамы) в зависимости от влияющих на них факторов. В приведенной конструктивной схеме теплицы поликарбонатные листы толщиной 16 мм укладываются по прогонам покрытия, которые на скатах кровли работают на косой изгиб. Расчетом установлено, что при раскреплении прогонов тяжами определяющим при подборе их сечения является второе предельное состояние.

Для прогонов из гнутых швеллеров при угле наклона скатов $\alpha = 30^\circ$ установлена зависимость расхода стали на 1 м² площади теплицы

$$G_{\text{пт}} = \frac{q^{\text{н}} a^3}{93,12} + \frac{4,1}{b} \text{ кг / м}^2, \quad (6)$$

где a – пролет прогона (шаг рам каркаса), м;

$q^{\text{н}}$ – нормативное значение нагрузки на горизонтальную проекцию покрытия, кН/м²;

b – расстояние между прогонами, м.

Из зависимости (6) следует, что с увеличением шага прогонов расход стали на них снижается (величина b находится в знаменателе). Следовательно, для снижения расхода стали на прогоны пролет укладываемых на них поликарбонатных листов должен быть максимально возможным исходя из их деформативности (при этом прочность листов обеспечивается). Установлено, что для I снегового района по СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» ($q^{\text{н}} = 0,22$ кН/м²) $b_{\text{max}} = 1,20$ м, для II района ($q^{\text{н}} = 0,424$ кН/м²) – 1,0 м, для III района ($q^{\text{н}} = 0,636$ кН/м²) – 0,85 м. При определении b_{max} расчетный прогиб листов принимался равным $b/150$ по СП 107.13330.2012, модуль упругости поликарбонатных листов $E = 2300$ Н/мм² по DIN 53457, момент инерции 1 м ширины поликарбонатного листа толщиной 16 мм – равным 9,75 см⁴ [1], коэффициент, учитываю-

Поставка и монтаж заводских металлоконструкций теплиц требуют значительных единовременных затрат, изменяющихся в зависимости от типа сооружения от 2 до 5 тыс. руб./м², что в дальнейшем может обусловить нерентабельность производства. Также заводы по производству фермерских теплиц находятся не в каждом регионе.

Теоретический расход стали на рамы каркаса теплицы, кг/м²

Пролет рам <i>L</i> , м	Снеговой район	Шаг рам <i>a</i> , м				
		2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
12	I	7,70	5,40	4,70	4,30	3,90
	II	9,30	6,80	5,90	5,40	4,80
	III	11,00	7,65	6,50	5,90	5,65

щий прогиб листов при многопролетной схеме их опирания, – равным 0,0068 [9].

Для нахождения закономерностей расхода стали на рамы каркаса теплицы применялась статистическая обработка результатов вычислений [10–12]. Данные о расходе стали на рамы каркаса приведены в таблице.

Для I – III снеговых районов установлены следующие зависимости расхода стали на рамы каркаса:

$$G_I = 1,01 + 0,091L + \frac{5,35}{a} + \frac{0,5L}{a} \text{ кг/м}^2, \quad (7)$$

$$G_{II} = 1,63 + 0,10L + \frac{5,21}{a} + \frac{0,64L}{a} \text{ кг/м}^2, \quad (8)$$

$$G_{III} = 1,63 + 0,12L + \frac{5,21}{a} + \frac{0,76L}{a} \text{ кг/м}^2. \quad (9)$$

Сварные рамы каркаса сплошного сечения рассчитывались как бесшарнирные. По сравнению с более легкими сквозными рамами сплошные рамы проще в изготовлении, монтаже и защите от коррозии в условиях фермерского хозяйства. Элементы рам подбирались из прокатных швеллеров по ГОСТ 8240–97 «Швеллеры стальные горячекатаные. Сортамент». Расход стали на рамы определялся в основном вертикальной нагрузкой, изменение ветровой нагрузки от 0,20 до 0,40 кН/м² расход стали увеличивало незначительно.

Шаг рам, соответствующий минимуму расхода стали на каркас сооружения для конкретного снегового района, можно установить, просуммировав зависимости (6)–(9), продифференцировав полученное выражение по *a* и подставив в производную значения *L* и *q^h*. Так, для I снегового района при *L* = 12 м и *q^h* = 0,22 кН/м² *a_{опт}* = 6,35 м, для II района *a_{опт}* = 5,55 м, для III района *a_{опт}* = 5,15 м. Для установленных оптимальных значений *a* удельный расход стали на каркас в I, II и III снеговых районах соответственно равен 7,9, 10,0 и 11,8 кг/м².

Заключение. Приведены формулы коэффициента ограждения для рассмотренных типов теплиц и сопоставлены их значения. Сравнительный анализ показал небольшое преимущество ангарных рамных теплиц с точки зрения теплопотерь и расхода материалов на светопрозрачное ограждение. По расходу стали и трудоемкости монтажа наиболее эффективны арочные теплицы.

Конструктивная форма блочных теплиц обуславливает возможность снегонакопления на кровле и ее разрушение. В связи с этим строительство многопролетных фермерских теплиц целесообразно в регионах с небольшими снеговыми нагрузками.

Ангарный тип теплиц наиболее приемлем для строительства в климатических зонах со значительными снеговыми осадками. Арочные и рамные теплицы характеризуются различными удельными показателями расхода стали и ограждающих конструкций, затратами на отопление. Выбор типа теплицы в конкретном случае должен экономически обосновываться.

Реализация предложенной конструктивной схемы однопролетной рамной теплицы в построенных условиях позволяет примерно в три раза уменьшить затраты на несущие металлоконструкции по сравнению с заводской поставкой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блажнов А.А., Фетисова М.А. Производственные сооружения для фермерских хозяйств. Орел: ООО ПФ «Картуш», 2017. 132 с.
2. Нуралин Б.Н., Некрасов В.Г., Мурзагалиев А.Ж., Шевченко С.А., Константинов М.М. Зимние теплицы для континентального климата // Изв. Оренбург. гос. аграр. ун-та. 2017. № 3(65). С. 81–84.
3. Блажнов А.А. О применении сотового поликарбоната в ограждающих конструкциях зимних теплиц // Вестн. строительства и архитектуры. № 6: сб. науч. тр. XI междунар. науч.-практ. конф., Орел, 25–27 апр., 2017 г. Орел: ООО ПФ «Картуш», 2017. С. 96–106.
4. Алимов Л.А., Воронин В.В. Строительные материалы. М.: Академия, 2014. 320 с.
5. Юдаев И.В. Изучение светопропускающих свойств сотового поликарбоната – покровного материала круглогодичных теплиц // Науч. журн. Кубан. ГАУ. 2016. № 120(06). С. 239–252.
6. Саттарова Р. Сотовый поликарбонат – теплосберегающее покрытие для фермерских теплиц // ГАВРИШ. М.: Науч.-исслед. ин-т овощеводства защищенного грунта, 2017. № 2. С. 48–49.
7. Новикова Ю.К., Голованова Л.А. Обзор современных светопрозрачных материалов // Новые идеи нового века–2015: матер. XV междунар. науч. конф. ФАДТОГУ, Хабаровск, 23 февр. – 02 марта, 2015 г. Хабаровск: Тихоокеан. гос. ун-т, 2015. Т. 3. С. 260–265.
8. Мухачёв А.Д. Применение поликарбонатов в качестве энергоэффективной светопрозрачной конструкции // Образование, наука, производство: материалы VII междунар. молодеж. форума, Белгород, 20–22 окт., 2015 г. Белгород: Белгород. гос. технолог. ун-т им. В.Г. Шухова, 2015. С. 1326–1329.
9. Справочник проектировщика. Расчетно-теоретический / под ред. А.А. Уманского. В 2 кн. Кн. 1. М.: Стройиздат, 1972. 600 с.
10. Елисеева И.И., Юзбашев М.М. Общая теория статистики. М.: Финансы и статистика, 2004. 656 с.
11. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Основы эконометрики. М.: ЮНИТИ – ДАНА, 2013. 432 с.
12. Елисеева И.И. Практикум по эконометрике. М.: Финансы и статистика, 2005. 192 с.

Блажнов Александр Александрович, канд. техн. наук, доц.;

E-mail:blazhnov47@mail.ru

Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина

Получено после доработки 14.02.18

Blazhnov Alexander Alexandrovich, PhD, Ass. Professor; E-mail: blazhnov47@mail.ru
Orel State Agrarian University named after N.V. Parakin

COMPARATIVE ASSESSMENT OF TYPES OF WINTER GREENHOUSES FOR FARMS

Considered the proposed market greenhouses year-round use for farms: multi-span hangar frame and arched. The effect of type of greenhouse to heat the structure. The formulas of the coefficient of greenhouses fencing for a variety of structural forms, which allows to determine their energy-efficient space planning options. Identifies the relative efficiency of translucent enclosing structures greenhouses. The proposed structural scheme of the hangar frame greenhouses are built the manufacture of rolled profiles construction solutions which minimize one-time costs and operating costs. Derived based on the specific consumption of steel on the frame members of the greenhouse and optimized its design parameters.

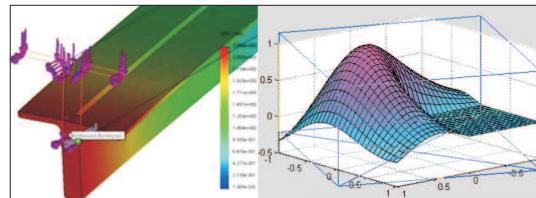
K e y w o r d s: types of greenhouses, energy-saving building solutions, optimization of the frame of the greenhouse.

REFERENCES

1. Blazhnov A.A., Fetisova M.A. Proizvodstvennye sooruzheniya dlya fermerskikh khozyaystv [Production facilities for farms]. Orel, Publishing house «Kartush», 2017. 132 p. (in Russian)
2. Nuralin B.N., Nekrasov V.G., Murzagaliyev A.Zh., Shevchenko S.A., Konstantinov M.M. Zimnie teplitsy dlya kontinental'nogo klimata [Winter greenhouses for continental climate]. Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Orenburg State Agrarian University]. 2017. No. 3(65). Pp. 81–84. (in Russian)
3. Blazhnov A.A. O primenenii sotovogo polikarbonata v ogranichivayushchikh konstruktsiyakh zimnikh teplits [On the application of cellular polycarbonate walling winter greenhouses]. Vestnik stroitel'stva i arkhitektury. No. 6: sb. nauch. trudov XI mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Bulletin of construction and architecture. No. 6: collection of scientific works. proceedings of the XI int. scientific.-pract. conf.]. Orel, 2017. Pp. 96–106. (in Russian)
4. Alimov L.A., Voronin V.V. Stroitel'nye materialy [Construction materials]. Moscow, Academy, 2014. 320 p. (in Russian)
5. Yudayev I.V. Izuchenie svetopropuskayushchikh svoystv sotovogo polikarbonata – pokrovnogo materiala kruglogodichnykh teplits [Investigation of the light transmitting properties of cellular polycarbonate – covering material of year-round greenhouses]. Nauchnyy zhurnal Kubanskogo GAU [Scientific journal of the Kuban GAU]. 2016. No. 120(06). Pp. 239–252. (in Russian)
6. Sattarov R. Sotovyj polikarbonat – teplosberegayushchee pokrytie dlya fermerskikh teplits [Polycarbonate – heat-saving coating for farm greenhouses]. GAVRISH [GAVRISH]. Moscow, Research Institute of vegetable growing of the protected ground. 2017. No. 2. Pp. 48–49. (in Russian)

7. Novikova Yu.K., Golovanova L.A. Obzor sovremennoykh svetoprotzrachnykh materialov [Review of modern translucent materials]. Novye idei novogo veka – 2015: mater. XV mezhdunar. nauch. konf. FADTOGU [The new Ideas of New Century–2015: The Fifteenth International Scientific Conference Proceedings]. Khabarovsk, 2015. Vol. 3. Pp. 260–265. (in Russian)
 8. Muhachev A.D. Primenenie polikarbonatov v kachestve energoeffektivnoy svetoprotzrachnoy konstruktsii [Use of polycarbonates as energy-efficient glass design]. Obrazovanie, nauka, proizvodstvo: materialy VII mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma [Education, science, production: mater. VII international youth forum]. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Pp. 1326–1329. (in Russian)
 9. Spravochnik proektirovshchika. Raschetno-teoreticheskiy [Directory of the designer. Calculated-theoretical]. Pod red. A.A. Umanskogo. V 2 kn. Kn.1. Moscow, Stroyizdat, 1972. 600 p. (in Russian)
 10. Eliseeva I.I., Yuzbashov M.M. Obshchaya teoriya statistiki [General Theory of Statistics]. Moscow, Finance and statistics, 2004. 656 p. (in Russian)
 11. Ayvazyan S.A. Prikladnaya statistika. Osnovy ekonometriki [Applied statistics. Basic econometrics]. Moscow, 2013. 432 p. (in Russian)
 12. Eliseeva I.I. Praktikum po ekonometrike [Workshop on econometrics]. Moscow, Finance and statistics, 2005. 192 p. (in Russian)
-

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



УДК 625.72

А.С. АЛЕКСАНДРОВ, Н.П. АЛЕКСАНДРОВА, Т.В. СЕМЕНОВА

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ СПЛОШНЫХ И ПОВРЕЖДЕННЫХ ТЕЛ К РАСЧЕТУ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ ПО КРИТЕРИЯМ ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ

Известно, что при воздействии повторных нагрузок асфальтобетонные покрытия автомобильных дорог накапливают повреждения, которые необходимо учитывать при их расчете. Для этого разработан способ модификации критериев прочности и условий пластичности, состоящий во введении в критерии прочности и условия пластичности сплошных тел мер теории поврежденности (сплошности или поврежденности). Для прогнозирования изменения сплошности и поврежденности использован принцип энергетической эквивалентности сплошных и поврежденных сред, в соответствии с которым получены функциональные зависимости этих мер от числа приложенных расчетных нагрузок. Модифицированы критерий прочности Писаренко–Лебедева и условие пластичности Кулона–Мора, которые учитывают эффект накапливания повреждений при расчете асфальтобетонного покрытия на сопротивление растяжению при изгибе и сдвигу.

Ключевые слова: асфальтобетон, поврежденность, сплошность, циклическая нагрузка, автомобильная дорога.

Теория накапливания повреждений учитывает влияние усталостных процессов на напряженно-деформированное состояние материала. Основы этой теории разработаны Л.М. Качановым и Ю.Н. Работновым, а их обобщение выполнено Д. Леметром. Мерами теории накапливания повреждений являются две скалярные величины – сплошность Л.М. Качанова ψ и поврежденность Ю.Н. Работнова ω . Учет эффекта накапливания повреждений выполняется применением принципов суммирования: линейного (гипотеза Пальмгрена – Майнера), билинейного (гипотеза С.С. Менсона) и нелинейного (гипотеза Ричарда – Ньюмарка). Применение этих принципов позволяет представить поврежденность как функцию числа нагрузок, действующих на материал, и параметров материала, зависящих от величины и продолжительности нагрузки, а также показателей физических свойств. Такие функции можно использовать при расчете материалов, испытывающих воздействие циклических нагрузок. Таким образом, применение мер теории накапливания повреждений и принципов прогнозирования их изменения в процессе воздействия повторных является актуальным вопросом для разработки и совершенствования методов расчета дорожных покрытий.

Для материалов, в структуре которых имеются несплошности, например поры, разработаны специальные критерии прочности и условия пластичности [1–8], представленные в табл. 1.

Эти критерии разработаны для пористых металлов, вследствие чего могут оказаться неприменимы для расчета асфальтобетонных покрытий на сопротивление усталостному растяжению от изгиба и сопротивление сдвигу. Поэтому в работах [9–11] предложен способ модификации критериев прочности и пластичности сплошных тел, базирующийся на принципе эквивалентности напряженного состояния поврежденного и неповрежденного тела. Суть способа состоит в том, что в соответствии с принципом эквивалентности напряжений любую компоненту тензора напряжений поврежденного тела $\sigma_{ij\omega}$ можно определить по формуле [11]:

$$\sigma_{ij\omega} = \frac{\sigma_{ij}}{1-\omega} = \frac{\sigma_{ij}}{\psi}, \quad (1)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений сплошного тела;

ω – поврежденность Ю.Н. Работнова;

ψ – сплошность Л.М. Качанова.

Таблица 1. Критерии, включающие меры теории поврежденности

Авторы	Математическое представление критерия
1. Критерий Шима–Оянэ [2]	$\frac{3 \cdot J_2}{2 \cdot \sigma_{tm}} + a \cdot n^b \cdot \left(\frac{I_1}{3 \cdot \sigma_{tm}} \right)^2 - (1-n)^5 = 0,$ где I_1 и J_2 – первый инвариант тензора напряжений и второй инвариант девиатора напряжений, Па и Па ² соответственно; a и b – параметры материала; σ_{tm} – предел текучести материала с нулевой пористостью (непористого материала); n – пористость
2. Критерий Гюрсона [3]	$\frac{3 \cdot J_2}{2 \cdot \sigma_{tm}} + 2 \cdot n \cdot \cos h \left(\frac{I_1}{2 \cdot \sigma_{tm}} \right) - (1+n)^2 = 0$
3. Критерий Твергаарда [4, 5]	$\frac{3 \cdot J_2}{2 \cdot \sigma_{tm}} + 2 \cdot a \cdot n \cdot \cos h \left(\frac{b \cdot I_1}{2 \cdot \sigma_{tm}} \right) - (1+(a \cdot n)^2) = 0$
4. Критерий Лии–Юнга [6]	$3 \cdot J_2 + 0,25 \cdot n \cdot I_1^2 + (1-n) \times \\ \times (R_{co} - R_{po}) \cdot (-I_1) = R_{co} - R_{po}(1-n)^2,$ где R_{co} и R_{po} – прочность на одноосное сжатие и растяжение эквивалентного непористого (неповрежденного) материала
5. Критерий Софрониса [7]	$2 \cdot J_2 \cdot \cos \Theta = \left(\frac{1+n}{1-n} \right)^{\frac{-m}{1+m}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{m \cdot n}{1 - \sqrt[m]{n}} \right)^{\frac{2}{1+m}} \cdot \left(\frac{I_1}{2 \cdot m} \right)^2},$ где m – параметр материала
6. Критерий Г.Г. Литвинского [8]	$\tau_{nt} = \tau_o \cdot \psi \cdot \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_o \psi} + 1 \right)^{a \cdot \psi}$

Из зависимости (1) следует, что главные напряжения в поврежденной $\sigma_{1\omega}$, $\sigma_{2\omega}$ и $\sigma_{3\omega}$ среде определяются по формулам:

$$\sigma_{1\omega} = \frac{\sigma_1}{1-\omega} = \frac{\sigma_1}{\psi}; \quad \sigma_{2\omega} = \frac{\sigma_2}{1-\omega} = \frac{\sigma_2}{\psi}; \quad \sigma_{3\omega} = \frac{\sigma_3}{1-\omega} = \frac{\sigma_3}{\psi}, \quad (2)$$

где σ_1 , σ_2 и σ_3 – главные напряжения в неповрежденном теле.

Зависимости (2) можно применить для расчета характеристик тензора и девиатора напряжений в поврежденном теле. Основные характеристики приведены в табл. 2 [9].

Применяя формулы табл. 2 в уравнениях предельного состояния критерии прочности и пластичности неповрежденных тел, их можно модифицировать так, что одним из параметров материала станет поврежденность или сплошность. Такие критерии прочности и условия пластичности приведены в табл. 3, 4.

Таблица 2. Характеристики напряженного состояния поврежденного тела

Наименование характеристики	Формула
Максимальные касательные напряжения $\tau_{max\omega}$	$\tau_{max\omega} = \frac{\tau_{max}}{1-\omega} = \frac{\tau_{max}}{\psi}; \quad \tau_{max\omega} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot (1-\omega)} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \psi},$ где τ_{max} – максимальное касательное напряжение в неповрежденном сплошном теле, Па
Октаэдрическое нормальное $\sigma_{okt\omega}$ и касательное $\tau_{okt\omega}$ напряжения	$\sigma_{okt\omega} = \frac{\sigma_{okt}}{1-\omega} = \frac{\sigma_{okt}}{\psi}; \quad \tau_{okt\omega} = \frac{\tau_{okt}}{1-\omega} = \frac{\tau_{okt}}{\psi},$ где σ_{okt} и τ_{okt} – нормальные и касательные напряжения на октаэдрических площадках сплошного тела, Па
Интенсивность нормальных $\sigma_{i\omega}$ и касательных $\tau_{i\omega}$ напряжений	$\sigma_{i\omega} = \frac{\sigma_i}{1-\omega} = \frac{\sigma_i}{\psi}; \quad \tau_{i\omega} = \frac{\tau_i}{1-\omega} = \frac{\tau_i}{\psi},$ где σ_i и τ_i – интенсивности нормальных и касательных напряжений в сплошном теле, Па
Инварианты тензора напряжений (первый $I_{1\omega}$, второй $I_{2\omega}$ и третий $I_{3\omega}$)	$I_{1\omega} = \frac{I_1}{1-\omega} = \frac{I_1}{\psi}; \quad I_{2\omega} = \frac{I_2}{(1-\omega)^2} = \frac{I_2}{\psi^2};$ $I_{3\omega} = \frac{I_3}{(1-\omega)^3} = \frac{I_3}{\psi^3},$ где I_1 , I_2 и I_3 – первый, второй и третий сплошного тела, Па, Па ² и Па ³ соответственно
Второй инвариант девиатора напряжений	$J_{2\omega} = \frac{1}{(1-\omega)^2} \cdot \left(I_2 - \frac{1}{3} \cdot I_1^2 \right) = \frac{1}{\psi^2} \cdot \left(I_2 - \frac{1}{3} \cdot I_1^2 \right)$
Третий инвариант девиатора напряжений	$J_{3\omega} = \frac{1}{(1-\omega)^3} \cdot \left(I_3 - \frac{1}{3} \cdot I_1 \cdot I_2 + \frac{2}{27} \cdot I_1^3 \right) =$ $= \frac{1}{\psi^3} \cdot \left(I_3 - \frac{1}{3} \cdot I_1 \cdot I_2 + \frac{2}{27} \cdot I_1^3 \right)$

Т а б л и ц а 3. Модифицированные критерии прочности для расчета асфальто-бетонных покрытий и оснований на растяжение от изгиба [9, 11, 12]

Наименование оригинального критерия	Уравнение предельного состояния модифицированного критерия
О. Мора	$\left(\sigma_1 - \frac{R_p}{R_c} \cdot \sigma_3 \right) \cdot \frac{1}{1-\omega} = R_p \text{ или}$ $\left(\sigma_1 - \frac{R_p}{R_c} \cdot \sigma_3 \right) \cdot \frac{1}{\psi} = R_p,$ <p>где R_c и R_p – пределы прочности на одноосное сжатие и растяжение от изгиба, Па</p>
Писаренко – Лебедева	$\frac{1}{1-\omega} \cdot [\chi \cdot \sigma_u + (1-\chi) \cdot \sigma_1] = R_p; \quad \chi = R_p / R_c,$ <p>где χ – коэффициент пластичности материала, характеризующий степень ответственности за микроразрушение сдвиговой деформации, создающей благоприятные условия для разрыхления материала и образования трещин [12]</p>
М-Х. Ю при:	$\sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + k_m \cdot \sigma_3}{1 + k_m}$ $\frac{1}{1-\omega} \cdot \left(\sigma_1 - \frac{k_m \cdot (b \cdot \sigma_2 + \sigma_3)}{1-b} \right) = R_p;$ $k_m = \frac{R_p}{R_c}; \quad b = \frac{R_p \cdot \tau_{np}}{(R_p - \tau_{np})} \cdot R_c$
	$\sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + k_m \cdot \sigma_3}{1 + k_m}$ $\frac{1}{1-\omega} \cdot \left(\frac{\sigma_1 + b \cdot \sigma_2 - k_m \cdot \sigma_3}{1+b} \right) = R_p$

Из анализа уравнений предельных состояний, представленных в табл. 3, 4 следует, что задача расчета асфальтобетонного покрытия сводится к вычислению поврежденности или сплошности, а также характеристик тензора и деформатора напряжений. При расчете асфальтобетонных покрытий и оснований на растяжение от изгиба компоненты тензора напряжений можно вычислять по формулам М.Б. Корсунского. При проверке условия сопротивления сдвига асфальтобетонного покрытия главные напряжения можно определить, используя метод, изложенный в работе [14].

В настоящее время известно два подхода к вычислению поврежденности. Первый подход основан на применении различных гипотез суммирования повреждений (линейного, билинейного и нелинейного), он применяется при расчете материалов на воздействие циклической нагрузки. Принцип линейного суммирования Пальмгрена – Майнера применялся Е.В. Угловой [15] для расчета поврежденности асфальтобетонного покрытия от воздействия подвижных нагрузок. Первый подход предназначен для прогнозирования увеличения поврежденности при воздействии длительной нагрузки, он основан на применении различных принципов эквивалентности состояний сплошной и поврежденной среды. Среди таких принципов наиболее часто применяют принцип эквивалентности деформаций и энергетической эквивалентности [16, 17]. В соответствии с этими принципами поврежденность

Т а б л и ц а 4. Модифицированные условия пластичности для расчета асфальто-бетонных покрытий по сопротивлению сдвигу [9–11, 13]

Наименование оригинального условия	Уравнение предельного состояния модифицированного критерия
Кулона – Мора	$\left(\frac{1}{\cos \varphi} \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \operatorname{tg} \varphi \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) \cdot \frac{1}{1-\omega} = c,$ где c и φ – сцепление и угол внутреннего трения асфальто-бетона, Па и рад. соответственно
Друкера – Прагера	$\frac{1}{(1-\omega)} \cdot \sqrt{\left(I_2 - \frac{1}{3} \cdot I_1^2 \right)} - a \cdot \frac{I_1}{1-\omega} - k = 0,$ где a и k – параметры материала, связанные с углом внутреннего трения и сцеплением
Ладе – Дункана	$\frac{I_1^3}{(1-\omega)^3} - k_{L-D} \cdot \frac{I_3}{(1-\omega)^3} = 0$
Матцуока – Накай	$\frac{I_1}{1-\omega} \cdot \frac{I_2}{(1-\omega)^2} - k_{M-N} \cdot \frac{I_3}{(1-\omega)^3} = 0$
Модифицированный трехпараметрический критерий Кулона–Мора	$\frac{1}{2 \cdot (1-\omega)} \cdot \left(\sigma_1 \cdot \left(\frac{1-\sin \varphi}{1+\sin \varphi} \right)^d - \left(\frac{1+\sin \varphi}{1-\sin \varphi} \right)^d \cdot \sigma_3 \right) = c,$ где d – параметр материала, зависящий от деформации, принимаемой за предельную величину при выполнении трехосных испытаний

является функцией отношения модуля упругости поврежденного E_D и неповрежденного E материала и определяется по формулам [16, 17]:

$$\omega = 1 - \frac{E_D}{E}; \quad \omega = 1 - \sqrt{\frac{E_D}{E}}. \quad (3)$$

Для определения сплошности необходимо воспользоваться соотношениями [18]:

$$\psi + \omega = 1; \quad \omega = 1 - \psi; \quad \psi = 1 - \omega. \quad (4)$$

Подставив зависимости (3) в третье выражение (4), получим:

$$\psi = \frac{E_D}{E}; \quad \psi = \sqrt{\frac{E_D}{E}}. \quad (5)$$

Первые формулы зависимостей (3) и (5) основаны на применении принципа эквивалентности деформаций поврежденного и неповрежденного тела, а вторые формулы этих зависимостей являются следствием применения принципа энергетической эквивалентности.

В настоящей работе авторы предпримут попытку разработки расчета модуля упругости поврежденного материала при воздействии повторной (циклической) нагрузки и последующего применения полученной зависимости

сти в фундаментальных формулах (3) и (5). В такой зависимости модуль упругости поврежденной среды должен являться функцией числа расчетных нагрузок.

Для математического моделирования введем допущения, что все нагрузки являются одинаковыми по величине оказываемого давления и продолжительности воздействия. В практике проектирования дорожных одежд это допущение реализуется приведением всех транспортных нагрузок к расчетной, под которой в ОДН 218.046–01¹ принимается нагрузка A_1 , A_2 или A_3 . Поэтому сделанное нами допущение соответствует требованиям ОДН 218.046–01, а значит, может быть использовано при математическом моделировании.

Процесс накапливания повреждений является непрерывным, потому что поврежденность монотонно возрастает при воздействии каждой последующей нагрузки. Поэтому для математического моделирования увеличения поврежденности и уменьшения сплошности можно применить интегральные уравнения наследственных теорий. Анализируя формулы (3) и (5), отметим, что модуль упругости поврежденной среды должен уменьшаться по мере увеличения числа повторных нагрузок.

Следовательно, для определения функции изменения модуля упругости можно также воспользоваться интегральными уравнениями наследственных. Подынтегральную функцию, определяющую приращение уменьшения модуля упругости от приложения нагрузки, имеющей порядковый номер n , зададим степенным уравнением

$$\Delta E_D = a \cdot n^b, \quad (6)$$

где a и b – параметры материала, зависящие от вида асфальтобетона и являющиеся сложной функцией температуры асфальтобетона, коэффициента уплотнения и т.п.

Составив интегральное уравнение, получим определенный собственный интеграл в виде

$$E_{DN} = E \cdot \left(1 - a \cdot \int_1^N n^b dn \right). \quad (7)$$

Если $b \neq 1$, то

$$E_{DN} = E \cdot \left(1 - a \cdot \frac{N^{b+1} - 1}{b + 1} \right). \quad (8)$$

Подставив (8) в зависимости (3), определим поврежденность по формуле:

$$\omega = a \cdot \frac{N^{b+1} - 1}{b + 1}; \quad \omega = 1 - \sqrt{1 - a \cdot \frac{N^{b+1} - 1}{b + 1}}. \quad (9)$$

¹ ОДН 218.046–01. Проектирование нежестких дорожных одежд. Взамен ВСН 46–83 / Росавтодор. М., 2000.

Анализируя данные работ [16, 17], укажем, что в настоящее время предпочтение отдают зависимостям расчета поврежденности, полученной с применением принципа энергетической эквивалентности. Поэтому в дальнейшем целесообразно применять вторую формулу (9). Подставив эту зависимость в третье выражение формул (4), получим

$$\psi = \sqrt{1 - a \cdot \frac{N^{b+1} - 1}{b + 1}}. \quad (10)$$

Таким образом, для расчета поврежденности необходимо применять вторую зависимость выражений (9), а для расчета сплошности формулу (10).

Параметры материала необходимо устанавливать лабораторными испытаниями. Целью таких испытаний должно являться определение модуля упругости при воздействии повторных нагрузок. Причем для определения параметров материала, слоев на сопротивление усталостному растяжению от изгиба, в лаборатории необходимо ставить эксперименты по изгибу асфальтобетонных балок циклической нагрузкой. Для определения параметров материала, используемых при расчете асфальтобетонных покрытий по сопротивлению сдвигу, нужно выполнять тестирование цилиндрических образцов многократно прикладываемой трехосной нагрузкой. Такие испытания реализуются в динамических приборах трехосного сжатия.

Выводы. 1. Для математического моделирования изменения сплошности и поврежденности в процессе воздействия повторных нагрузок могут применяться принципы эквивалентности деформаций поврежденной и сплошной среды, а также принцип их энергетической эквивалентности, в которых для расчета модуля упругости поврежденного материала используются интегральные уравнения наследственных теорий.

2. Приращение уменьшения модуля упругости в результате воздействия от n -й нагрузки описывается степенной функцией.

3. Интегрированием уравнений получены степенные математические модели (9) и (10), которые позволяют с достаточной точностью определять поврежденность и сплошность при воздействии повторяющихся нагрузок.

4. Задачами дальнейших исследований являются:

– разработка экспериментальных методик и их применение для определения параметров материала, зависящих от вида асфальтобетона, температуры, коэффициента уплотнения и т.д., и их использования в моделях (9) и (10);

– модификации расчета асфальтобетонных покрытий и оснований по критерию сопротивления усталостному растяжению от изгиба, в котором применяются критерии, представленные в табл. 3, и зависимости (9) и (10);

– разработка нового метода модификации расчета асфальтобетонных покрытий по сопротивлению сдвигу, в котором применяются условия пластичности, представленные в табл. 4, а также зависимости (9) и (10).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Altenbach H., Tushnev K.A. A new static failure criterion for isotropic polymers // Mechanics of Composit Materials. 2001. Vol. 37(5-6). P. 731–743.

2. Shima S., Oyane M. Plasticity theory for porous metals // International Journal of Mechanical Sciences. 1976. Vol. 18. P. 285 – 291.
3. Gurson A.L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth; I. Yield criteria and flow rules for porous ductile media // J. Eng. Materials Technol. 1977. Vol. 99. No. 1. P. 2–15.
4. Tvergaard V. Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions // Int. J. Fracture. 1981. Vol. 17. P. 389–407.
5. Tvergaard V., Needleman A. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar // Acta Metall. 1984. Vol. 32. P. 157–169.
6. Lee J.H., Oung J. Yield functions and flow rules for porous pressure-dependent strain-hardening polymeric materials // J. Appl. Mech. 2000. Vol. 67. No. 2. P. 288–297.
7. Sofronis P., McMeeking R.M. Creep of power-law material containing spherical voids // J. Appl. Mech. 1992. Vol. 59. No. 2. P. 88–95.
8. Литвинский Г.Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов: монография / ДонГТУ. Донецк: Норд-Пресс, 2008. 207 с.
9. Александрова Н.П., Александров А.С., Чусов В.В. Модификация критериев прочности и условий пластичности при расчетах дорожных одежд // Вестн. СибАДИ. 2015. № 1 (41). С. 47–54.
10. Александрова Н.П., Чусов В.В. О расчете асфальтобетонных покрытий по сопротивлению сдвигу с учетом накапливания микроповреждений // Вестн. СибАДИ. 2016. № 3 (49). С. 42–50.
11. Aleksandrova N.P., Chysow V.V. The usage of integral equations hereditary theories for calculating changes of measures of the theory of damage when exposed to repeated loads // Magazine of Civil Engineering, 2016. No. 2 (62). P. 69–82.
12. Лебедев А.А. Развитие теорий прочности в механике материалов // Пробл. прочности. 2010. № 5. С. 126–147.
13. Александров А.С., Калинин А.Л. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Ч. 1. Учет деформаций в условии пластичности Кулона – Мора // Инж.-строит. журн. 2015. № 7 (59). С. 4–17.
14. Александров А.С., Долгих Г.В., Калинин А.Л. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Ч. 2. Модифицированные модели расчета главных и касательных напряжений // Инж.-строит. журн. 2016. № 2 (62). С. 51–68.
15. Углова Е.В. Теоретические и методологические основы оценки остаточного усталостного ресурса асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог: автореф. ... д-ра техн. наук. Волгоград: ВолГАСУ, 2009. 38 с.
16. Lemaitre J., Desmorat R. A Course on Damage Mechanics. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2005. 380 p.
17. Shen J. et al. Material damage evaluation with measured microdefects and multiresolution numerical analysis // International Journal of Damage Mechanics. 2014. Vol. 23(4). P. 537–566.
18. Сосновский Л., Щербаков С. Концепции поврежденности материалов // Вестн. ТНТУ. 2011. Спецвып. Ч. 1. С. 14–23.

Александров Анатолий Сергеевич, канд. техн. наук, доц.

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

Александрова Наталья Павловна, канд. техн. наук, доц.

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

Семенова Татьяна Викторовна, канд. техн. наук, доц.

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

Получено 27.02.18

Aleksandrov Anatoliy Sergeevich, PhD, Ass. Professor

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

Aleksandrova Natal'ya Pavlovna, PhD, Ass. Professor

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

Semenova Tat'yana Viktorovna, PhD, Ass. Professor

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

APPLICATION OF THE PRINCIPLE OF ENERGY EQUIVALENCE OF CONTINUOUS AND DAMAGED BODIES TO CALCULATION OF ASPHALT CONCRETE COATINGS BY STRENGTH AND PLASTICITY CRITERIA

It is known that when exposed to repeated loads, asphalt concrete road surface covers accumulate damages that must be taken into account when calculating them. For this purpose, a method has been developed for modifying the strength criteria and plasticity conditions, which consists in introducing in the strength criteria and conditions for the plasticity of continuous bodies the measures of damage theory (continuity or damage). To predict the change in continuity and damage, the principle of energy equivalence of continuous and damaged media was used, according to which the functional dependences of these measures on the number of applied design loads were obtained. Pisarenko-Lebedev's strength test and the Coulomb-Mohr plasticity condition were modified, which take into account the effect of damage accumulation when calculating the asphalt-concrete coating on the tensile strength during bending and shearing.

К e y w o r d s: asphaltic concrete, damage, continuity, cyclic load, road.

REFERENCES

1. Altenbach H., Tushet K.A. A new static failure criterion for isotropic polymers. Mechanics of Composite Materials. 2001. Vol. 37(5-6). Pp. 731–743.
2. Shima S., Oyanne M. Plasticity theory for porous metals. International Journal of Mechanical Sciences. 1976. Vol. 18. Pp. 285–291.
3. Gurson A.L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth; I. Yield criteria and flow rules for porous ductile media. J. Eng. Materials Technol. 1977. Vol. 99. No. 1. Pp. 2–15.
4. Tvergaard V. Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions. Int. J. Fracture. 1981. Vol. 17. Pp. 389–407.
5. Tvergaard V., Needleman A. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. Acta Metall. 1984. Vol. 32. Pp. 157–169.
6. Lee J.H., Oung J. Yield functions and flow rules for porous pressure-dependent strain-hardening polymeric materials. J. Appl. Mech. 2000. Vol. 67. No. 2. Pp. 288–297.
7. Sofronis P., McMeeking R.M. Creep of power-law material containing spherical voids. J. Appl. Mech. 1992. Vol. 59. No. 2. Pp. 88–95.
8. Litvinitskiy G.G. Analiticheskaya teoriya prochnosti gornykh porod i massivov: monografiya [Analytical theory of strength of rocks and arrays: monography]. DonGTU, Donetsk, Nord-Press, 2008. 207 p. (in Russian)

9. Aleksandrova N.P., Aleksandrov A.S., Chysow V.V. Modifikatsiya kriteriev prochnosti i usloviy plastichnosti pri raschetakh dorozhnykh odezhd [Modification of strength criteria and plasticity conditions in the calculation of road clothes]. Vestnik SibADI [Papers of the SibADI]. 2015. No. 1 (41). Pp. 47–54. (in Russian)
 10. Aleksandrova N.P., Chysow V.V. O raschete asfal'tobetonnykh pokrytiy po soprotivleniyu sdvigu s uchetom nakaplivaniya mikropovrezhdeniy [On the calculation of asphalt-concrete coatings for shear resistance, taking into account the accumulation of microdamages]. Vestnik SibADI [Papers of the SibADI]. 2016. No. 3 (49). Pp. 42–50. (in Russian)
 11. Aleksandrova N.P., Chysow V.V. The usage of integral equations hereditary theories for calculating changes of measures of the theory of damage when exposed to repeated loads. Magazine of Civil Engineering. 2016. No. 2 (62). Pp. 69–82.
 12. Lebedev A.A. Razvitiye teoriy prochnosti v mehanike materialov [The development of strength theories in the mechanics of materials]. Problemy prochnosti [Strength problems]. 2010. No. 5. Pp. 126–147. (in Russian)
 13. Aleksandrov A.S., Kalinin A.L. Sovrshennostvovanie rascheta dorozhnykh konstruktsiy po soprotivleniyu sdvigu. Chast'1. Uchet deformatsiy v uslovii plastichnosti Coulomb–Mohr [Improving the calculation of road structures for shear resistance. Part 1. The account of deformations in the Coulomb–Mohr plasticity condition]. Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal [Engineering and construction magazine]. 2015. No. 7 (59). Pp. 4–17. (in Russian)
 14. Aleksandrov A.S., Dолгих G.V., Kalinin A.L. Sovrshennostvovanie rascheta dorozhnykh konstruktsiy po soprotivleniyu sdvigu. Chast' 2. Modified models for calculating principal and tangential stresses]. Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal [Engineering and construction magazine]. 2016. No. 2 (62). Pp. 51–68. (in Russian)
 15. Uglanova E.V. Teoreticheskie i metodologicheskie osnovy otsenki ostatochnogo ustalostnogo resursa asfal'tobetonnykh pokrytiy avtomobil'nykh dorog: avtoref. ... d-ra techn. nauk [Theoretical and methodological basis for assessing the residual fatigue life of asphalt concrete road surface coatings: author's abstract. ... DSc]. Volgograd, VolgASU, 2009. 38 p. (in Russian)
 16. Lemaitre J., Desmorat R. A Course on Damage Mechanics. Verlag Berlin Heidelberg, Springer, 2005. 380 p.
 17. Shen J. et al. Material damage evaluation with measured microdefects and multiresolution numerical analysis. International Journal of Damage Mechanics. 2014. Vol. 23(4). Pp. 537–566.
 18. Sosnovskiy L., Shcherbakov S. Kontseptsii povrezhdennosti materialov [Material Damage Concepts]. Vestnik TNTU [Bulletin of TSU]. 2011. Special issue. P. 1. Pp. 14–23. (in Russian)
-

УДК 539.421

В.Т. КУЗАВОВ, В.В. ДЕГТЯРЕВ

ОБРАЗОВАНИЕ МИКРОТРЕЩИН ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ И СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ МАТЕРИАЛОВ

Представлены новые экспериментальные результаты исследований образования микротрещин при динамических и статических воздействиях на материалы. Известно, что при циклических нагрузках возникают субмикроскопические и микроскопические трещины и разрушение механизмов и машин связывают с их возникновением. Но механизм возникновения этих трещин в современной литературе неизвестен. Представлены экспериментальные результаты, объясняющие новый механизм образования микротрещин. При динамических и статических нагрузках в материалах образуются спиральные и цилиндрические микроканалы, которые являются источниками микротрещин. Разрушение исследуемых материалов связано с формированием в них ранее неизвестных в литературе спиральных и цилиндрических каналов. Разрушение материалов, образование микротрещин в исследуемых материалах связано с фокусировкой акустической энергии на оси спиральных структур на каждом витке спирали вдоль ее оси.

Ключевые слова: разрушение, микротрещины, спиральные структуры.

Усталостное разрушение происходит путем зарождения и распространения трещин. Нагрузки и деформации, при которых происходит усталостное разрушение, намного ниже тех, которые приводят к разрушению в статических условиях [1]. Следует учитывать многоцикловую и малоцикловую усталость, т.е. учитывать условия, в которых работал агрегат до аварии. По поводу зарождения трещин в теории прочности существует два подхода: механический и кинетический [2]. При механическом подходе разрыв межатомной связи происходит в том случае, если сила, действующая на нее, больше некоторой критической и разрыв происходит мгновенно. При кинетическом подходе разрыв межатомной связи происходит при значении силы меньше критической, за счет воздействия на нее тепловой флуктуации.

Известно, что усталостное напряжение может проявить себя внезапно, без появления каких-либо прогрессирующих изменений в свойствах материала [3–5]. Их невозможно спрогнозировать. Это означает, что в результате приложения пульсирующих (циклических) нагрузок в сооружениях и агрегатах образуются, накапливаются и не залечиваются микродефекты, которые в определенный момент времени начинают взаимодействовать друг с другом, что и приводит к разрушению. В зависимости от структурного состояния, вида нагружения предел выносливости металлов и сплавов может быть выше и ниже физического предела текучести. В настоящее время известно, что фундаментальной особенностью поведения металлов, подвергающихся разрушению, является непременное наличие перед разрушением микро- или макродеформации. Наличие этих стадий зависит от частоты

ты и амплитуды нагружения. При очень низкой частоте нагружения разрушение отсутствует.

Необходимость улучшения характеристик машин и механизмов и продления сроков их эксплуатации неразрывно связано с изучением механизма образования микродефектов приложении различных нагрузок. Выяснению причин образования скрытых микродефектов приложении статических и динамических нагрузок посвящена эта работа.

Процессы, связанные с кавитационным разрушением, можно рассматривать как циклические, с многоцикловой усталостью. Зарождение скрытых микродефектов на лопастях гидроагрегатов происходит незаметно в течение длительного времени. В этом случае циклические нагрузки невелики и деформации упруги.

В принятой (существующей) модели [6, 7] эрозионное разрушение происходит за счет удара кумулятивных струй, образующихся при несимметричном захлопывании кавитационных пузырьков вблизи твердой поверхности и воздействию ударных волн, образующихся при захлопывании кавитационных пузырьков. В работах [8–10] была предложена новая модель эрозионного разрушения. В новой модели кавитационное разрушение происходит на небольшой глубине от свободной поверхности (10–300 мкм) в спиральных и прямолинейных структурах, образующихся в исследуемых материалах вблизи свободной поверхности.

На рис. 1 представлена спиральная структура, образовавшаяся в органическом стекле толщиной 1 мм при проведении эксперимента в рамках постановки вибрационной эрозии. Возникает вопрос, какие структуры образуются в материалах при динамических и статических нагрузлениях.

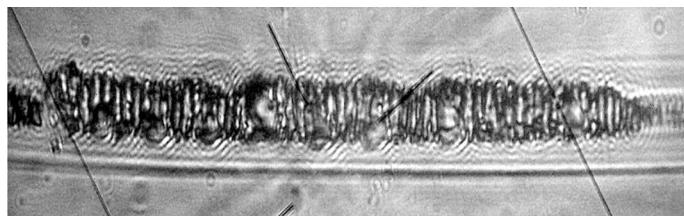


Рис. 1

С этой целью были проведены экспериментальные исследования разрушения органического стекла при статическом нагружении (растяжение, сдвиг) и при динамических испытаниях (взрыв проволочки внутри органического стекла).

Растяжение. Эксперименты при растяжении и сдвиге проводились в стандартных условиях разрушения образцов из органического стекла толщиной 5 мм и более с известной скоростью нагружения и сдвига на стандартных испытательных (разрывных) установках. Марка испытательной машины WPM, VEB Thuringer Industriewerk Rauenstein. Рабочие поверхности испытываемых образцов тщательно полировались. После проведения экспериментов разрушенные части образцов рассматривались в оптическом микроскопе с большим увеличением и фиксировались повреждения как на поверхности, так и внутри его объема. На рис. 2 представлены волн-

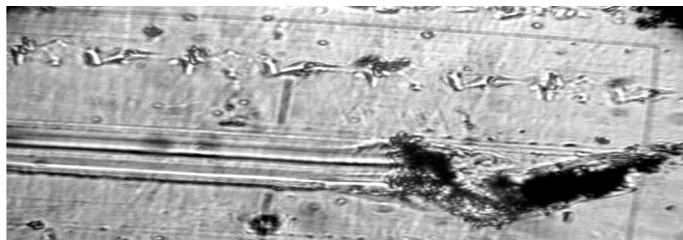


Рис. 2

вые структуры, образующиеся вблизи свободной поверхности. Это прямолинейные структуры, диаметр которых примерно 20–30 мк. Каналы начинают взаимодействовать друг с другом, и структура разрушается. В этом же месте на поверхности образца появляются разрушения в виде темных областей. Обращаем внимание на темные области, так как ожидаемые разрушения должны быть светлыми. Объяснения будут представлены при обсуждении всех экспериментов. На рис. 3 представлена другая структура с двумя прямолинейными каналами, на поверхности которых образуется микротрещина по всей длине этих каналов. Эти структуры образуются не только вблизи свободной поверхности, но и в глубине образцов. Отметим главное: структуры являются источником возникновения микротрещин, т.е. источником разрушения.

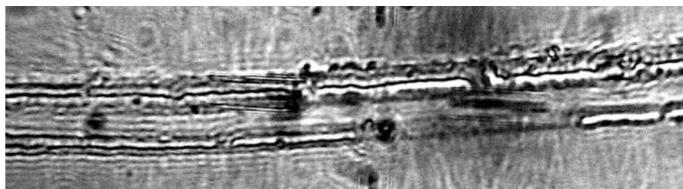


Рис. 3

Сдвиг. При сдвиге образуются структуры, подобные структурам, образующимся при растяжении. Такие же прямолинейные каналы с микротрещинами, такое же взаимодействие между каналами. Поэтому фотографии этих структур не приведены. На рис. 4 показаны спиральные структуры определенной длительности, которые следуют в каналах друг за другом на определенном расстоянии. Структура канала, в котором они образуются, сходна со структурами, полученными при растяжении и сдвиге. Но там представлены только прямолинейные каналы, спиральных структур нет. Спиральные структуры присутствуют всегда и на прямолинейных каналах, но их энергия мала, и видны только прямолинейные каналы, а самих спиральных структур

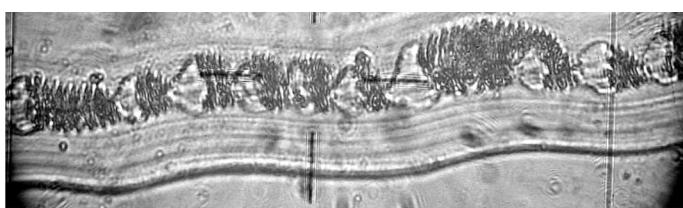


Рис. 4

не видно. Прямолинейные каналы – это след спиральных структур. Пояснения будут даны при обсуждении результатов. Главное же состоит в том, что как при кавитационном разрушении, при растяжении, так и при сдвиге образуются волновые структуры, в которых развиваются микротрешины, что приводит к разрушению материалов. До сих пор рассматривались экспериментальные результаты образования прямолинейных и спиральных структур в статике.

Далее рассмотрим взрыв проволочки в образце из оргстекла толщиной 6 мм. На рис. 5 представлена спиральная структура, шаг в которой не изменяется. В отдельных местах витки не заметны, поэтому кажется, что шаг ее меняется. На рис. 6 видна структура, по всей длине которой образуется микротрешина, а в верхней ее части возникают темные повреждения с определенным шагом. Можно предположить, что внутри этого канала следуют друг за другом спиральные структуры определенной длительности, которые приводят к появлению этих темных участков.

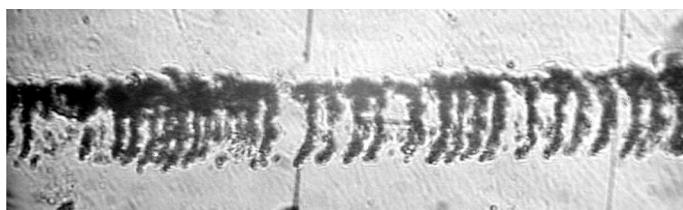


Рис. 5



Рис. 6

Подобные разрушения были и в статике. Во всех проведенных экспериментах в статике и динамике в исследуемых материалах образуются прямолинейные и спиральные структуры, являющиеся источниками образования микротрешин, обнаружить которые современными методами диагностики невозможно. Они обнаруживаются не только вблизи свободной поверхности, но и при удалении слоя полировки этой поверхности, т.е. во всем объеме исследуемых образцов.

Выходы. На основании проведенных экспериментов установлено, что как в статике, так и в динамике образуются прямолинейные и спиральные структуры, которые являются источниками образования микротрешин. В данной работе исследовалась тонкая структура образования микротрешин в стекле и не утверждалось, что представленные результаты распространяются на металлы. Прямолинейные каналы возникают при фокусировке в спи-

ральных структурах акустической энергии на каждом витке вдоль ее оси. В результате фокусировки на оси спиральной структуры выделяется энергия, значительно превышающая прочностные характеристики материалов, что приводит к появлению микротрещин и их разрушению. Поэтому разрушенные зоны в прямолинейных каналах и в спиральных структурах темного цвета, так как на оси спиральных структур повышаются давление и температура.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. М.: Мир, 1984. 624 с.
2. Терентьев В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. М.: Интернет Инжиниринг, 2002. 287 с.
3. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. М.: Металлургия, 1984. 280 с.
4. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. М.: Металлургия, 1975. 455 с.
5. Горицкий В.М., Терентьев В.Ф. Структура и усталостное разрушение металлов. М.: Металлургия, 1980. 207 с.
6. Кнэпп Р. Кавитация. М.: Мир, 1974. 687 с.
7. Прис К. Эрозия. М.: Мир, 1982. 464 с.
8. Кузавов В.Т., Дегтярев В.В. Новые постановки в исследовании кавитационной эрозии // Изв. вузов. Строительство. 2009. № 9. С. 105–109.
9. Кузавов В.Т. Структура и особенности разрушения материалов при кавитационной эрозии в новой постановке // Изв. вузов. Строительство. 2010. № 7. С. 113–117.
10. Кузавов В.Т. Кавитационное разрушение материалов в спиральных структурах в постановке вибрационной эрозии // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 6. С. 90–94.

Кузавов Василий Тимофеевич, канд. физ.-мат. наук; E-mail: kuzavov@hydro.nsc.ru
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск
Дегтярев Владимир Владимирович, д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 15.02.18

Kuzavov Vasiliy Timofeevich, PhD; E-mail: kuzavov@hydro.nsc.ru
Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of Siberian Branch of Russia Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia
Degtyarev Vladimir Vladimirovich, DSc, Professor
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

FORMATION OF MICRO-FRACTURE UNDER DYNAMIC AND STATIC LOADING OF MATERIALS

The paper presents new experimental results of studies of the formation of microcracks under dynamic and static effects on materials. It is known that under cyclic loads submicroscopic and microscopic cracks arise and the destruction of mechanisms and machines is associated with their occurrence. But the mechanism of occurrence of these cracks in the modern literature is unknown. The paper presents experimental results

explaining the new mechanism of microcrack formation. Under dynamic and static loads, spiral and cylindrical microchannels are formed in the materials, which are the sources of microcracks. Destruction of the investigated materials is associated with the formation in them of previously unknown in the literature of spiral and cylindrical channels. The destruction of materials, the formation of microcracks in the materials under study is associated with the focusing of acoustic energy on the axis of the spiral structures at each coil of the spiral along its axis.

K e y w o r d s: destruction, micro-fracture, spiral structures.

REFERENCES

1. Collins J.A. Povrezhdenie materialov v konstruktsiyakh [Failure of materials in mechanical design]. Moscow, Mir, 1984. 624 p. (in Russian)
2. Terent'ev V.F. Ustalostnaya prochnost' metallov i splavov [The fatigue strength of metals and alloys]. Moscow, Internet Inginiring, 2002. 287 p. (in Russian)
3. Vladimirov V.I. Fizicheskaya priroda razrusheniya metallov [The physical nature of fracture of metals]. Moscow, Metallurgy, 1984. 280 p. (in Russian)
4. Ivanova V.S., Terent'ev V.F. Priroda ustalosti metallov [The nature of fatigue of metals]. Moscow, Metallurgy, 1975. 455 p. (in Russian)
5. Goritskiy V.M., Terent'ev V.F. Struktura i ustalostnoe razrushenie metallov [Structure and fatigue failure of metals]. Moscow, Metallurgy, 1980. 207 p. (in Russian)
6. Knepp R. Kavitatsiya [Cavitation]. Moscow, Mir, 1974. 687 p. (in Russian)
7. Pric K. Eroziya [Erosion]. Moscow, Mir, 1982. 464 p. (in Russian)
8. Kuzavov V.T., Degtyarev V.V. Novye postanovki v issledovanii kavitatsionnoy erozii [New approach in research of cavitation erosion]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2009. No. 9. Pp. 105–109. (in Russian)
9. Kuzavov V.T. Struktura i osobennosti razrusheniya materialov pri kavitatsionnoy erozii v novoy postanovke [Structure and destructin of materials due to cavitation erosion in a new approach]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2010. No. 7. Pp. 113–117. (in Russian)
10. Kuzavov V.T. Kavitatsionnoe razrushenie materialov v spiral'nykh strukturakh v postanovke vibratsionnoy erozii [Cavitation destruction of materials in spiral structures the setting of vibrational erosion]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No. 6. Pp. 90–94. (in Russian)

В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ



УДК 624.012.45

В.В. АДИЩЕВ, В.В. МАЛЬЦЕВ, В.К. ШУЛЬГА

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В БАЛКАХ С ЗАРАНЕЕ ОРГАНИЗОВАННЫМИ ТРЕЩИНАМИ*

Проведено экспериментальное исследование балок с заранее организованными трещинами с использованием поляризационно-оптического метода. Получены распределения нормальных напряжений в окрестности трещины. Экспериментально определена зона краевого эффекта, а также характер изменения нейтральной линии вблизи трещины. Использован ПК ANSYS для определения напряженно-деформированного состояния в окрестности трещины. Предложен оригинальный способ моделирования балки с заранее организованными трещинами. Данные численного моделирования подтвердили экспериментально полученный результат о независимости длины зоны краевого эффекта от прикладываемой нагрузки. Введено понятие «условной нейтральной линии», которая является границей, разделяющей изополя деформаций сжатия и растяжения в продольном направлении.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, зона краевого эффекта, заранее организованная трещина, численное моделирование, ANSYS, «условная нейтральная линия».

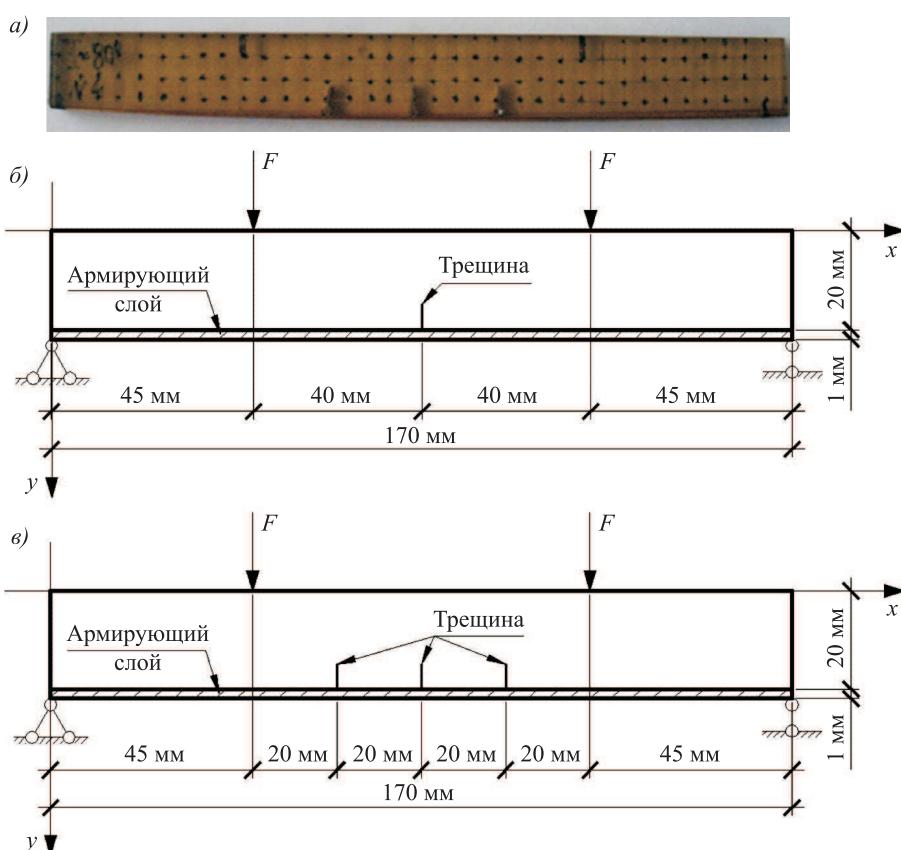
1. Введение. В последние десятилетия была сформулирована и поставлена в виде ряда математических моделей задача построения алгоритма «сквозного» расчета изгибаемого железобетонного элемента в рамках энергетической теории сопротивления железобетона, предложенной В.М. Митасовым и В.В. Адищевым [1, 2]. «Сквозной» расчет предполагает расчет напряженно-деформированного состояния железобетонного элемента от начала нагружения до возникновения и стабилизации трещины нормально-го отрыва. Для составления энергетических соотношений, замыкающих системы уравнений, необходимо знать, как изменяется напряженно-деформированное состояние при образовании трещины, а также протяженность так называемой зоны краевого эффекта в окрестности трещины, в которой существенно изменяется напряженно-деформированное состояние. Под

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

зоной краевого эффекта понимается характерная длина изгибающего элемента в окрестности трещины, на которой существенными являются касательные напряжения, а также наблюдается резкое изменение напряжений в продольном направлении. Так, в работах Г.Н. Албаут [3–5] отмечено, что нейтральная линия после образования трещины имеет волнобразный характер, на расстоянии около половины высоты балки слева и справа от трещины. В настоящей работе с помощью поляризационно-оптического метода [6–9] экспериментально получены распределения нормальных напряжений в балках с заранее организованными трещинами и определена зона краевого эффекта.

2. Экспериментальное исследование. Исследование напряженного состояния изгибающегося армированного элемента проводилось в условиях чистого изгиба (четырехточечный изгиб) на образце с одной трещиной высотой 5 мм, а также на образце с тремя трещинами высотой 7 мм (рис. 1, *a*). Ширина заранее организованных трещин 0,2 мм. Толщина образцов – 6 мм, процент армирования $\mu \approx 5\%$, защитный слой армирующего элемента не предусмотрен.

Образцы выполнены из связующего материала – фенолформальдегидная смола «Хромвинил В-276», армирующий слой – стеклопластик «АГ-4С».



*Рис. 1. Опытный образец с тремя трещинами (*a*); схема испытания образцов: с одной трещиной (*б*), с тремя трещинами (*в*)*

Соотношения предельных сопротивлений ($R_{\text{арматура}}, R_{\text{смоля}}$) и модулей упругости ($E_{\text{арматура}}, E_{\text{смоля}}$):

$$\frac{R_{\text{арматура}}}{R_{\text{смоля}}} \approx \frac{500[\text{МПа}]}{40[\text{МПа}]} \approx 12,5; \quad \frac{E_{\text{арматура}}}{E_{\text{смоля}}} \approx \frac{38000[\text{МПа}]}{3200[\text{МПа}]} \approx 11,87.$$

Схемы нагружения и габариты образцов представлены на рис. 1, 6, в. Ступень нагружения каждой силы $F = 50$ Н. Максимальное значение усилия $F_{\max} = 200$ Н.

В результате поляризационно-оптического эксперимента на поляризационно-проекционной установке ППУ-7 получены картины полос интерференции (рис. 2, 3), позволяющие наглядно оценить зону краевого эффекта. В ходе эксперимента были обнаружены остаточные (усадочные) напряжения при отсутствующем механическом воздействии $F = 0$ Н на образцы (см. рис. 2, а; 3, а).

Напряжения на свободном контуре σ_k от нагрузки определяются согласно зависимости [9]:

$$\sigma_k = (\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{\sigma_0^{1,0} n}{b}, \quad (1)$$

где $\sigma_1 - \sigma_2$ – разница главных напряжений;

$\sigma_0^{1,0}$ – цена полосы материала;

n – порядок полосы интерференции;

b – толщина модели.

В области чистого изгиба главные напряжения определяются по формулам:

$$\sigma_1 = \sigma_x = \frac{M_x}{W_x}, \quad \sigma_2 = 0, \quad (2)$$

где M_x – изгибающий момент;

$W_x = bh^2/6$ – момент сопротивления для прямоугольного сечения;

h – высота образца.

Приравняв выражение (1) к выражениям (2), получим зависимость для определения цены полосы интерференции $\sigma_0^{1,0}$ в балке при чистом изгибе:

$$\sigma_0^{1,0} = \frac{M_x b}{W_x n_{\max}} = \frac{6F}{h^2 n_{\max}} a, \quad (3)$$

где a – расстояние от опоры до ближайшей силы F ;

n_{\max} – максимальный порядок интерференционной полосы, соответствующей нагрузке F .

Чтобы свести погрешность эксперимента к минимуму, цена полосы материала по напряжениям определяется как среднее арифметическое значение результатов нескольких нагрузений [9].

При $F = 100$ Н для балки с одной трещиной максимальный порядок полосы интерференции $n_{\max} = 3$ (см. рис. 2, б), при $F = 200$ Н – $n_{\max}^{200} = 5$

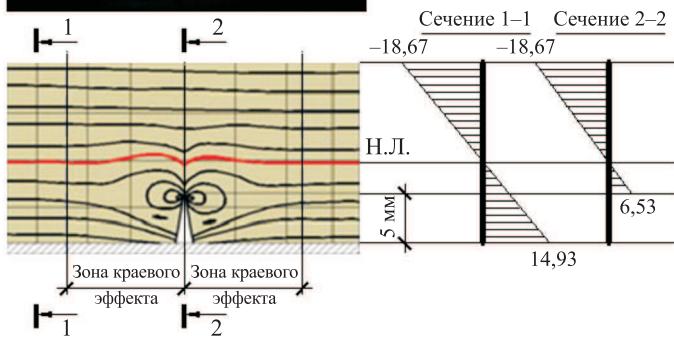
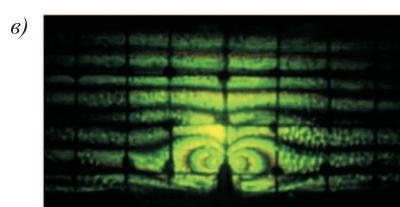
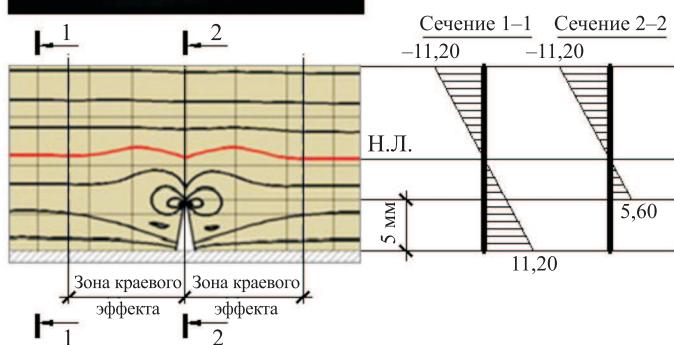
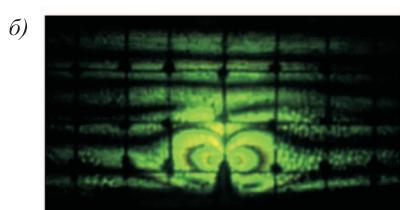
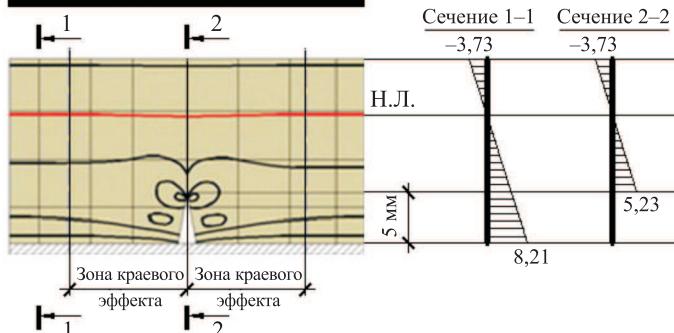
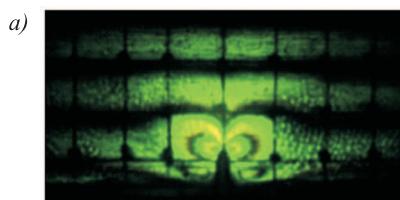


Рис. 2. Картина полос интерференции и эпюры напряжений σ_x (МПа) для образца с одной заранее организованной трещиной при нагрузке $F = 0 \text{ N}$ (а); $F = 100 \text{ N}$ (б); $F = 200 \text{ N}$ (в)

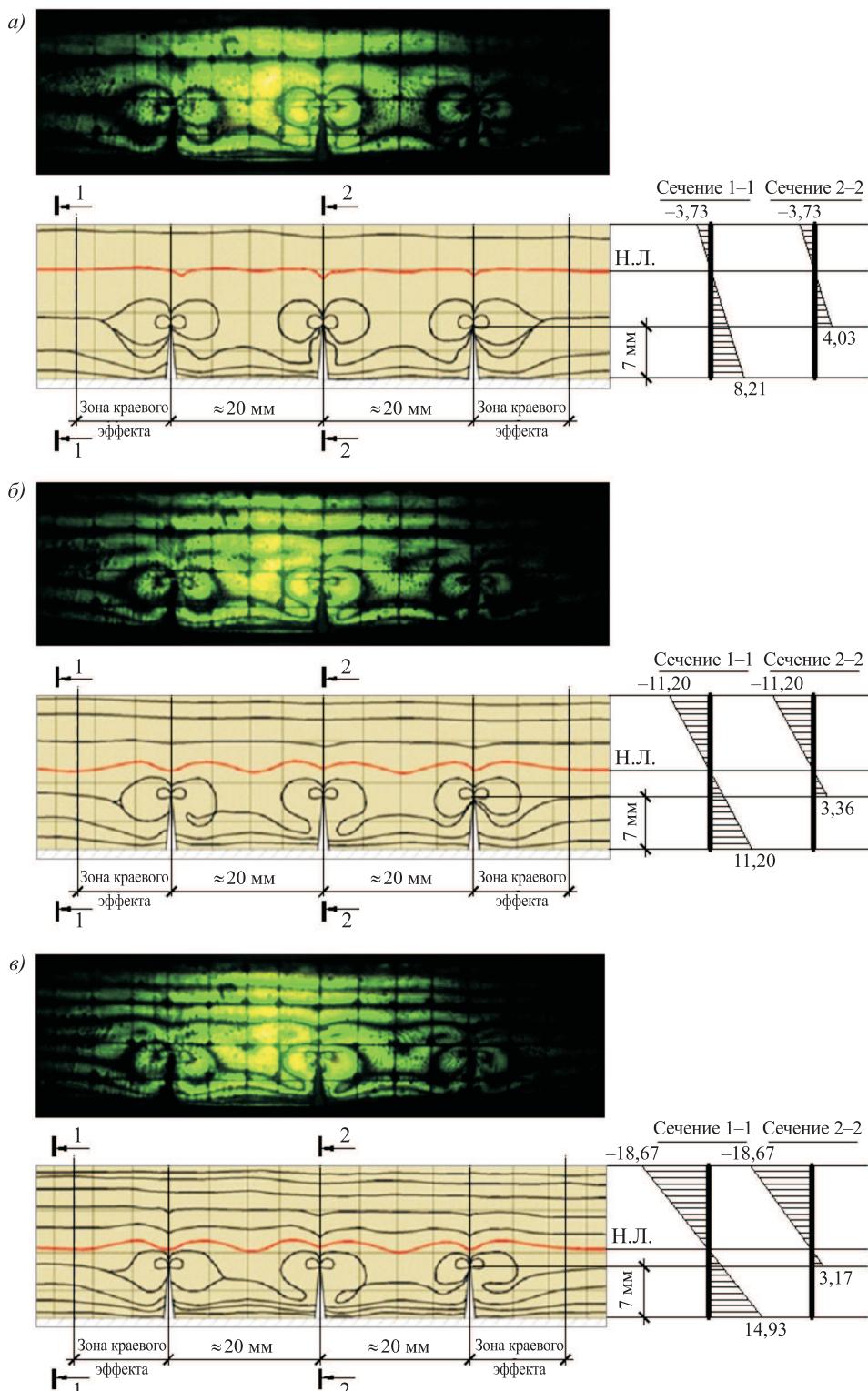


Рис. 3. Картина полос интерференции и эпюры напряжений σ_x (МПа) для образца с тремя заранее организованными трещинами при нагрузке $F = 0 \text{ H}$ (a); $F = 100 \text{ H}$ (б); $F = 200 \text{ H}$ (в)

(см. рис. 2, в). По формуле (3) цена полосы материала для данных нагрузок примет вид:

$$\sigma_{0,100}^{1,0} = \frac{6 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{21^2 \cdot 10^{-6} \cdot 3} 4,5 = 2,04;$$

$$\sigma_{0,200}^{1,0} = \frac{6 \cdot 200 \cdot 10^{-6}}{21^2 \cdot 10^{-6} \cdot 5} 4,5 = 2,44,$$

тогда среднее арифметическое цены полосы материала $\sigma_0^{1,0} = 2,24$ МПа · см.

На рис. 2 приведены эпюры нормальных напряжений вдоль оси x , определенные по формуле (1), над трещиной (сечение 2-2) и на расстоянии 15 мм от трещины (сечение 1-1) для балки с одной трещиной. Красной линией на картине полос интерференции обозначена нейтральная линия (Н.Л.).

По аналогии построены эпюры нормальных напряжений вдоль оси x (рис. 3) для балки с тремя трещинами над трещиной (сечение 2-2) и на расстоянии 35 мм от центральной трещины (сечение 1-1).

По результатам экспериментального исследования выявлено, что зона краевого эффекта при увеличении нагрузки остается постоянной ~ 12 мм, при этом зафиксировано перемещение нейтральной линии (Н.Л. на рис. 2, 3) к вершине трещины при увеличении нагрузки. Предполагается, что данное изменение высоты сжатой зоны возможно из-за наличия в образце остаточных (усадочных) напряжений и (или) большого процента армирования сечения.

3. Численный эксперимент. Проведено численное исследование напряженно-деформированного состояния шарнирно-опертых балок с заранее организованными трещинами (см. рис. 1) в трехмерной постановке в ПК ANSYS.

Основная сложность при создании геометрической модели и расчетной сетки в данной задаче связана с моделированием трещины, обусловленная малым размером ширины трещины 0,2 мм по сравнению с остальными размерами образцов (рис. 4, а). Данная особенность требует сгущения сетки до 0,2 мм для более точной аппроксимации геометрии в окрестности трещины [10], что в свою очередь повлияет на увеличение времени вычислений.

Для упрощения геометрической модели предлагается следующий способ моделирования балок с заранее организованными трещинами: с помощью

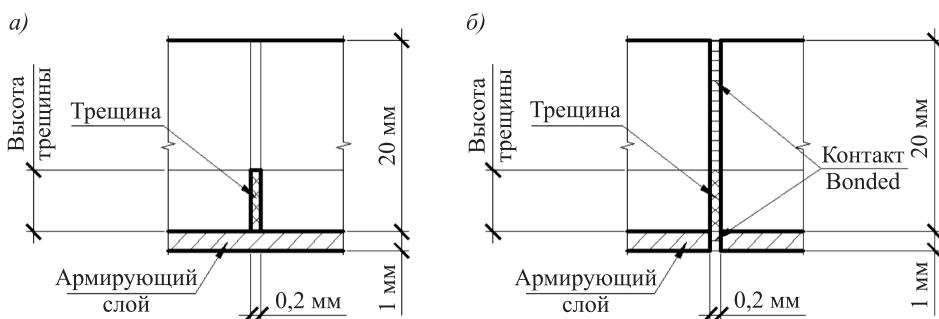


Рис. 4. Принципиальная расчетная схема фрагмента балки в окрестности трещины: без использования контактов (а); с использованием контактов типа bonded (б)

жесткого контакта типа bonded (рис. 4, б), который не допускает проскальзывания и разделения связанных между собой поверхностей [11], балка разделяется на два отдельных тела, зазор между которыми соответствует ширине трещины 0,2 мм. Совместная работа данных тел обеспечивается за счет жестких контактов bonded над трещиной и между армирующим элементом. Контакт по высоте трещины не предусмотрен. Достоинством данного способа моделирования является возможность создания однотипной структурированной сетки по всей длине образца как в двухмерной, так и трехмерной постановке. В данном случае использована гексаэдрическая сетка со стороной элемента 1 мм.

Результаты численного моделирования в ПК ANSYS для образцов с одной и тремя трещинами для сечений 1-1 и 2-2 (см. рис. 2, 3) сопоставлены с экспериментальными данными, приведенными ниже. На рис. 5 изображены экспериментально найденные распределения напряжений в продольном направлении σ_x (зеленая и черная линии) с учетом влияния остаточных деформаций: из эпюра напряжений σ_x при $F = 100$; 200 Н (см. рис. 2, б, в; 3, б, в) вычитается эпюра напряжений σ_x , соответствующая остаточным (усадочным) напряжениям при $F = 0$ Н (см. рис. 2, а; 3, а).

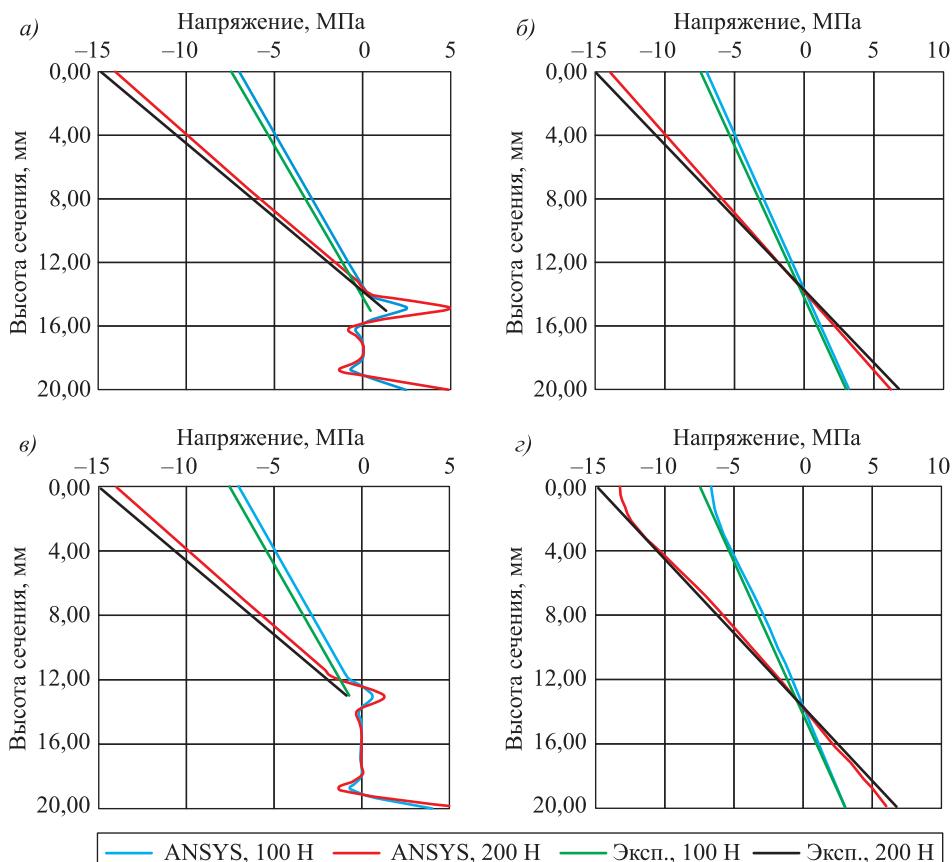


Рис. 5. Распределение напряжений в продольном направлении σ_x по высоте сечения балки: в сечениях 1-1 (а) и 2-2 (б) для балки с одной трещиной; в сечениях 1-1 (в) и 2-2 (г) для балки с тремя трещинами

В результате эксперимента и численного моделирования выявлено, что распределения напряжений в продольном направлении σ_x по высоте сечения балки мало отличаются от линейного в сечении 1-1 над трещиной и по всей высоте сечения 2-2 (рис. 5). Криволинейный характер распределения нормальных напряжений σ_x в сжатой области в балке с тремя трещинами (рис. 5, г) обусловлен влиянием сосредоточенной силы F , находящейся на расстоянии 5 мм от сечения 2-2.

Результаты расчетов для балок с заранее организованными трещинами, полученные с помощью численного моделирования в ПК ANSYS, продемонстрировали хорошую согласованность расчетного напряженно-деформированного состояния с экспериментальными данными (см. таблицу). Данные численного моделирования подтвердили экспериментально полученный результат о независимости длины зоны краевого эффекта от прикладываемой нагрузки (см. рис. 2, 3), разница с экспериментом не превышает 8 %.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Параметр	Балка с одной трещиной				Балка с тремя трещинами			
	Эксперимент		ANSYS		Эксперимент		ANSYS	
	100 Н	200 Н	100 Н	200 Н	100 Н	200 Н	100 Н	200 Н
Зона краевого эффекта, мм	12	12	11	11	12	12	11	11
Напряжение σ_x в сечении 1-1 (сжатая область), МПа	-7,47	-14,93	-7,03	-14,07	-7,47	-14,93	-7,03	-14,06
Напряжение σ_x в сечении 2-2 (сжатая область), МПа	-7,47	-14,93	-6,98	-13,97	-7,47	-14,93	-6,64	-13,28
Напряжение σ_x в сечении 2-2 (растянутая область), МПа	2,99	6,72	3,20	6,20	2,99	6,72	2,90	6,00
Высота сжатой зоны X_R в сечении 1-1, мм	14,29	13,79	13,52	13,52	13,00	13,00	12,47	12,47
Высота сжатой зоны X_R в сечении 2-2, мм	14,29	13,79	13,96	13,96	14,29	13,79	13,83	13,83
Прогиб верхнего волокна балки, мм	-	-	0,556	1,113	-	-	0,559	1,118
Прогиб нижнего волокна балки, мм	-	-	0,558	1,117	-	-	0,561	1,122

Погрешность определения напряжений σ_x в сечениях 1-1 и 2-2 с помощью численного моделирования составляет 3–11 % для сжатой и растянутой области по сравнению с напряжениями, определенными экспериментально.

Высота сжатой зоны X_R , определенная экспериментально (рис. 5), в сечениях 1-1 и 2-2 превышает на 1–5 % высоту сжатой зоны, найденную с помощью численного моделирования в ПК ANSYS. По результатам эксперимента и численного моделирования в образце с тремя заранее организованными трещинами высота сжатой зоны находится ниже вершины трещины (рис. 6). Это позволяет сделать вывод, что трещина оказывает не очень значи-

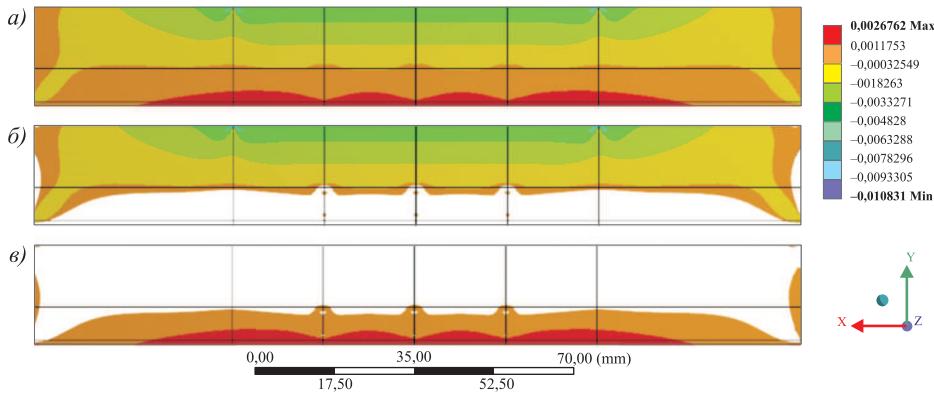


Рис. 6. Изополя деформаций в продольном направлении ε_{xx} для образца с тремя трещинами: деформации сжатия и растяжения (а); деформации сжатия (б); деформации растяжения (в)

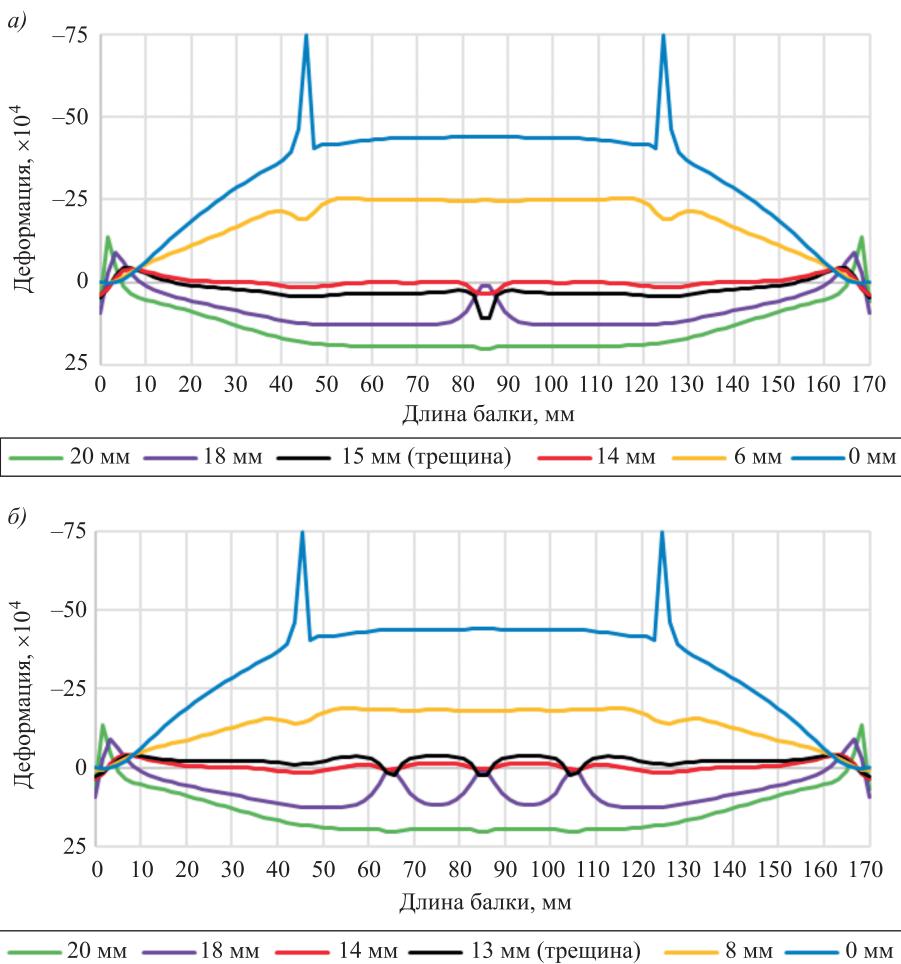


Рис. 7. Распределение деформаций в продольном направлении ε_{xx} для балки: с одной трещиной (а); с тремя трещинами (б)

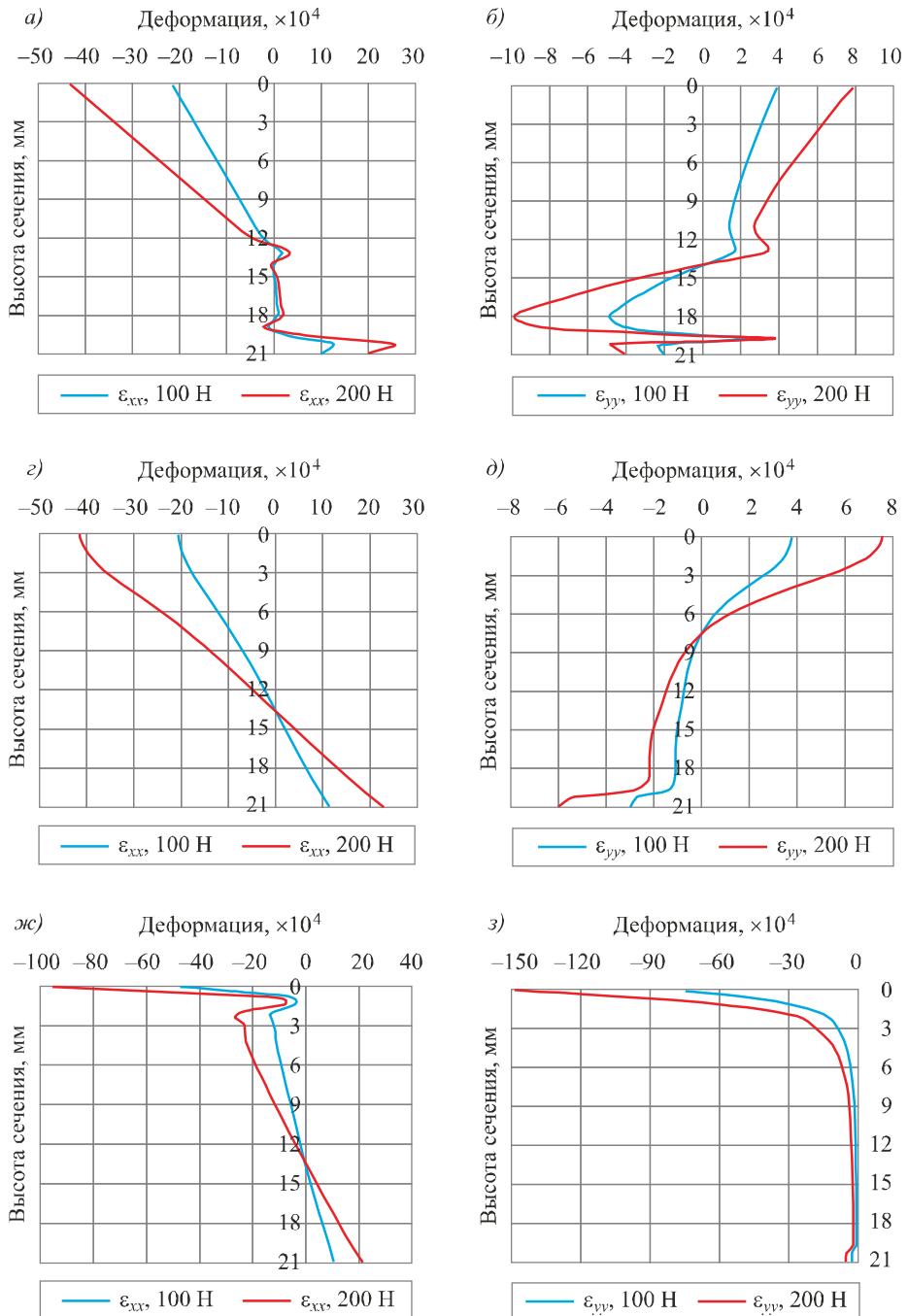
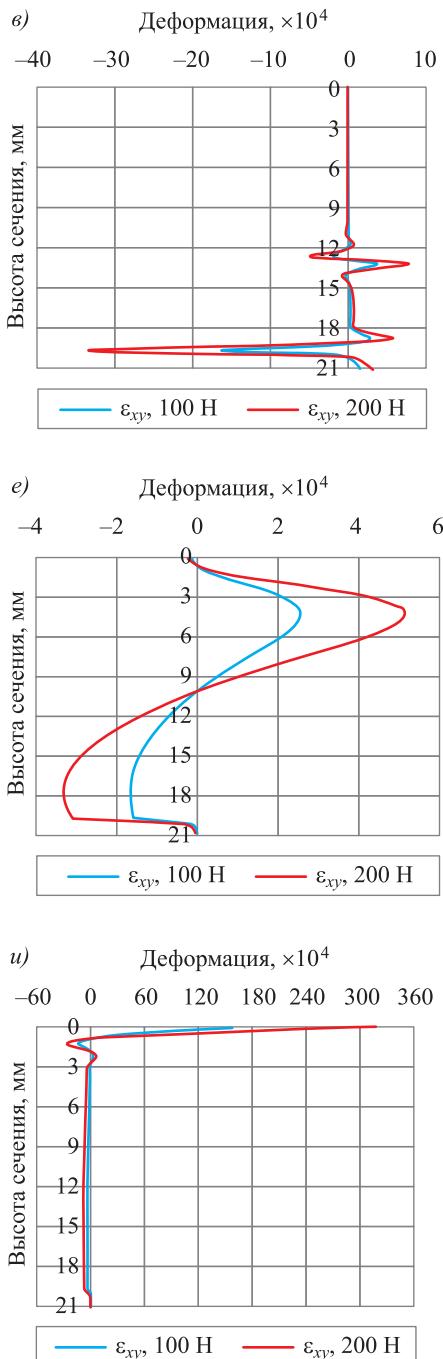


Рис. 8. Распределение продольных ε_{xx} , поперечных ε_{yy} и сдвиговых ε_{xy} деформациями: в сечении 1-1 (а-е); в сечении 2-2 (ж-е); в месте приложения

тельное влияние из-за высокого процента армирования сечения. Границу, разделяющую изополя деформаций ε_{xx} сжатия и растяжения, можно считать «условной нейтральной линией».

Для балки с одной и тремя трещинами на рис. 7 приведены деформации ε_{xx} для различных сечений вдоль балки. «Пики» в сечении с координатой



по высоте сечения балки с тремя трещинами F (ж-и)

ный способ моделирования балки в окрестности трещины с помощью жесткого контакта типа *bonded*.

Сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов в ПК ANSYS для балок с заранее организованными трещинами позволяет сделать следующие выводы.

0 мм (синяя линия) соответствуют местам приложения нагрузки F к верхней поверхности балки (см. рис. 1), а черной линией с примечанием «трещина» изображена координата вершины трещины. Красная линия (рис. 7) обозначает сечение «приведенного нейтрального слоя» – сечение, по длине которого деформации максимально приближаются к нулевым. Деформации вблизи «приведенного нейтрального слоя» в окрестности трещины имеют криволинейный (волнообразный) характер, при удалении от данного слоя (сечения 6 мм и 0 мм) деформации выравниваются.

На рис. 8 представлены распределения продольных ϵ_{xx} , поперечных ϵ_{yy} и сдвиговых ϵ_{xy} деформаций по высоте сечения балки для сечений 1-1 и 2-2 (см. рис. 3), а также в сечении, соответствующем месту приложения нагрузки F (см. рис. 1). По результатам численного моделирования выявлено, что деформированное состояние в окрестности всех трех трещин практически совпадает (рис. 8, a–в).

В окрестности трещин возникают значительные сдвиговые деформации; при удалении от трещины влияние сдвиговых деформаций ϵ_{xy} уменьшается (рис. 8, в, е, и), высокие деформации в верхней части сечения (рис. 8, ж–и) обусловлены тем, что сосредоточенная нагрузка F приложена в этом сечении.

4. Заключение. Выполнено численное моделирование в ПК ANSYS балок с заранее организованными трещинами. Предложен оригиналь-

Данные численного моделирования подтвердили экспериментально полученный результат о независимости длины зоны краевого эффекта от прикладываемой нагрузки, отличие от эксперимента не превышает 8 %.

Напряжения σ_x в окрестности трещины, полученные с помощью численного моделирования, хорошо согласуются (погрешность 3–11 %) с напряжениями, определенными экспериментально.

Высота сжатой зоны в окрестности трещины, определенная экспериментально, превышает на 1–5 % высоту сжатой зоны, найденную с помощью численного моделирования. Трещина оказывает не очень значительное влияние на характер распределения продольных напряжений и деформаций в балке с тремя заранее организованными трещинами из-за высокого процента армирования сечения.

Введено понятие «условной нейтральной линии», которая является границей, разделяющей изополя деформаций ϵ_{xx} сжатия и растяжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Митасов В.М., Адищев В.В. Основные предпосылки построения энергетической теории сопротивления железобетона // Изв. вузов. Строительство. 2010. № 5. С. 3–9.
2. Митасов В.М., Адищев В.В. Основные положения энергетической теории сопротивления железобетона // Изв. вузов. Строительство. 2010. № 6. С. 3–7.
3. Албат Г.Н., Барышников В.Н., Митасов В.М. Моделирование образования и развития трещин в армированных балках // Изв. вузов. Строительство. 1996. № 8. С. 133–135.
4. Албат Г.Н., Барышников В.Н. Основы методов нелинейной фотоупругости и их применение в инженерном проектировании конструкций. Новосибирск: НГАСУ, 1997. 107 с.
5. Албат Г.Н. Нелинейная фотоупругость в приложении к задачам механики разрушения. Новосибирск: НГАСУ, 2002. 113 с.
6. Фрохт М. Фотоупругость. М.: Гостехиздат, 1948. Т. 1. 432 с.
7. Фрохт М. Фотоупругость. М.: Гостехиздат, 1950. Т. 2. 488 с.
8. Дюрэlli А., Райли У. Введение в фотомеханику (поляризационно-оптический метод). М.: Мир, 1970. 576 с.
9. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М.: Наука, 1973. 576 с.
10. Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В., Федорова Н.Н. Основы работы в ПК ANSYS 16.0. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2015. 240 с.
11. Басов К.А. ANSYS: Справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.

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

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
Мальцев Виктор Васильевич, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
Шульга Виктор Константинович, инж.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Adishchev Vladimir Vasil'evich, DSc, Professor

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

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

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

Shul'ga Viktor Konstantinovich, Engineer

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

INVESTIGATION OF STRESS-STRAIN STATE IN THE BEAM WITH PREFORMED CRACKS

An experimental study of beams with preformed cracks using a polarization-optical method was carried out. Distributions of normal stresses in the vicinity of the crack were obtained. The zone of the edge effect is determined experimentally, as well as the character of the change in the neutral line near the crack. Used PC ANSYS to determine the stress-strain state in the vicinity of the crack. An original way of modeling a beam with preformed cracks was proposed. Numerical simulation data confirmed the experimentally obtained result on the independence of the length of the edge effect zone from the applied load. The notion of a «conditional neutral line» is introduced, which the boundary is separating the isospin of compression deformations and stretching in the longitudinal direction.

K e y w o r d s: stress-strain state, edge effect zone, preformed crack, numerical simulation, ANSYS, «conditional neutral line».

REFERENCES

1. M i t a s o v V.M., A d i s h c h e v V.V. Osnovnye predposylnki postroeniya energeticheskoy teorii soprotivleniya zhelezobetona [Main preconditions of creating energy theory of reinforced concrete strength]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2010. No. 5. Pp. 3–9. (in Russian)
2. M i t a s o v V.M., A d i s h c h e v V.V. Osnovnye polozheniya energeticheskoy teorii soprotivleniya zhelezobetona [Main regulations of energy theory of reinforced concrete strength]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2010. No. 6. Pp. 3–7. (in Russian)
3. A l b a u t G.N., B a r y s h n i k o v V.N., M i t a s o v V.M. Modelirovaniye obrazovaniya i razvitiya treshchin v armirovannykh balkakh [Modeling of the formation and development of cracks in reinforced beams]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 1996. No. 8. Pp. 133–135. (in Russian)
4. A l b a u t G.N., B a r y s h n i k o v V.N. Osnovy metodov nelineynoy fotouprugosti i ikh primenenie v inzhenernom proektirovanii konstruktsiy [Fundamentals of nonlinear photoelasticity and its application in the engineering design of structures]. Novosibirsk, NGASU, 1997. 107 p. (in Russian)
5. A l b a u t G.N. Nelineynaya fotouprugost' v prilozhenii k zadacham mekhaniki razrusheniya [Nonlinear photoelasticity in the application to the problems of destruction mechanics]. Novosibirsk, NGASU, 2002. 113 p. (in Russian)
6. F r o k h t M. Fotouprugost' [Photoelasticity]. Moscow, Gostekhizdat, 1948. Vol. 1. 432 p. (in Russian)
7. F r o k h t M. Fotouprugost' [Photoelasticity]. Moscow, Gostekhizdat, 1950. Vol. 2. 488 p. (in Russian)
8. D y u r e l l i A., R i l e y U. Vvedenie v fotomekhaniku (polyarizatsionno-opticheskiy metod) [Introduction to photomechanics (polarization-optical method)]. Moscow, Mir, 1970. 576 p. (in Russian)

9. A l e x a n d r o v A.Ya., A k h m e t z y a n o v M.Kh. Polyarizatsionno-opticheskie metody mekhaniki deformiruemogo tela [Polarization-optical methods of mechanics of a deformable body]. Moscow, Nauka, 1973. 576 p. (in Russian)
 10. V a l ' g e r S.A., D a n i l o v M.N., Z a k h a r o v a Yu.V., F e d o r o v a N.N. Osnovy raboty v PK ANSYS 16.0 [Fundamentals of work in PC ANSYS 16.0]. Novosibirsk, NGASU (Sibstrin), 2015. 240 p. (in Russian)
 11. B a s o v K.A. ANSYS: Spravochnik pol'zovatelya [ANSYS: User's manual]. Moscow, DMK Press, 2005. 640 p. (in Russian)
-

БЕТОНИРОВАНИЕ В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ

В Новосибирском государственном архитектурно-строительном университете (Сибстрин) разработан метод бетонирования в зимних условиях. Эксперт-центр НГАСУ предлагает всем организациям, производящим бетонные работы в зимних и особо сложных условиях производства, разработку технологических карт для предотвращения морозного пучения грунта оснований на контакте с бетоном, особо тонкостенных или массивных конструкций, при экстремально низких температурах $-25\dots-40^{\circ}\text{C}$.

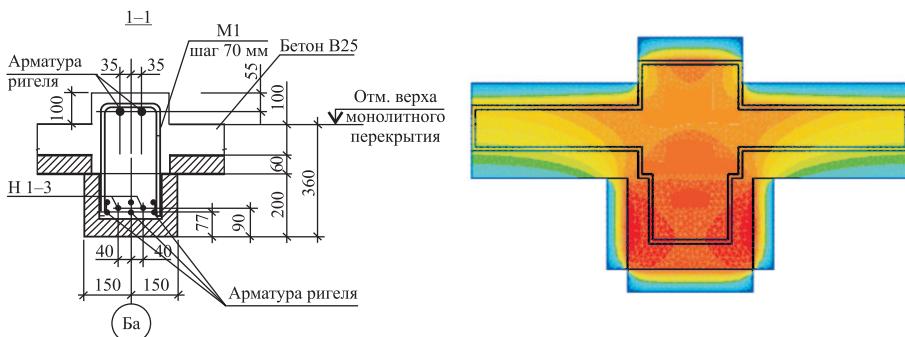
Исходные данные для разработки технологической карты:

- опалубочные чертежи бетонируемых конструкций;
- чертежи армирования;
- характеристики используемого утеплителя опалубки и бетона.

В состав технологической карты входит:

- рассчитанная визуализация температурных полей;
- графики изменения температуры во времени в характерных точках сечения конструкции.

В описании дается расчет набираемой прочности в зависимости от условий электротермообработки. Указывается тип, марка греющих проводов, схема их раскладки и схема их коммутации с трансформатором.



Опалубочный чертеж и картина температурного поля бетона

Технологическая карта содержит все предусмотренные СНиП 3.03.01-87 пункты.

В процессе разработки технологической карты производится решение тепловой и электротехнической задачи. Тепловая задача решается численным методом на сертифицированном программном обеспечении, что позволяет рассчитывать любые конструктивные узлы для любых погодно-климатических условий. Решение электротехнической задачи производится под имеющееся у заказчика оборудование и условия производства работ.

В настоящее время этот метод активно внедряется в России. В 2016 г. на Третьей международной конференции речь шла о будущем внедрении этого метода в Монголии.

Разработчик

ТИТОВ Михаил Михайлович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: agd_tmm48@mail.ru

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

www.sibstrin.ru/innovation; тел.+7(383)266 42 81; 266 43 83

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗООКСИДНЫХ ПИГМЕНТОВ

В Томском государственном архитектурно-строительном университете разработан способ получения железооксидных пигментов из техногенного сырья – отходов водоподготовки станций обезжелезивания (на примере шлама с содержанием железа не менее 42 % ООО «Томскводоканал»). Шлам сушат, прокаливают путем постепенного нагрева на специальном устройстве и измельчают. Цвет полученного пигмента зависит от температуры нагрева:

- 600 °C – шоколадно-коричневый;
- 800 °C – ярко-красный;
- 1050 °C – черный.



После достижения требуемой температуры устройство для прокаливания отключают. Экспериментально установлено, что пигмент из отходов водоподготовки характеризуется хорошими технологическими качествами: однородностью состава, высокой степенью дисперсности и диспергируемости.

ПРЕИМУЩЕСТВО ПРЕДЛОЖЕНИЯ

При очистке подземных вод с высоким содержанием железа, характерным для районов Севера, Сибири и Дальнего Востока, в промышленности и ЖКХ образуется большое количество шламов, основу которых составляют железосодержащие соединения – потенциальное сырье для получения пигментов. Замена им традиционного дорогостоящего гидроксида железа, полученного химическим путем, позволяет:

- утилизировать железосодержащий шлам водоподготовки с получением железооксидных пигментов, пригодных для строительной отрасли;
- решить экономические и экологические проблемы, связанные с техногенным прессингом на окружающую среду;
- применять железооксидные пигменты, имеющие широкую цветовую гамму, для окраски силикатного кирпича, тротуарной плитки, бетонных изделий и т.д., что способствует преображению серых городских кварталов.

На изобретение получен патент.

Разработчики:

ЛУКАШЕВИЧ Ольга Дмитриевна, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: odluk@yandex.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

УСОВА Надежда Терентьевна, канд. техн. наук

Томский государственный архитектурно-строительный университет

ГЕРБ Любовь Владимировна, гл. технолог ООО «Томскводоканал»

ГОНЧАРОВ Олег Юрьевич, начальник цеха водоснабжения ООО «Томскводоканал»

Патентообладатель Томский государственный архитектурно-строительный университет

634003, г. Томск, пл. Соляная, 2

Internet: www.tsuab.ru; тел. +7(3822) 66 01 45

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
«СТРОИТЕЛЬСТВО»

Издаётся с марта 1958 г.

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

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

ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ ЖУРНАЛА:

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

Принимается подписка
на 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».

Внимание!

1. Объем аннотации – не менее 800 знаков (75 слов и более), максимум 1200 знаков.
2. Библиографический список должен включать не менее десяти источников.
3. Составление библиографического списка на английском языке (REFERENCES):
 - для ссылок на зарубежные источники на латинице – с сохранением оригинального описания;
 - для ссылок на русскоязычные источники – транслитерированные с русских букв на латинские символы (по системе BGN) фамилии и инициалы всех авторов; название статьи; затем в квадратных скобках – название статьи в переводе на английский язык; остальные элементы библиографического описания на английском языке, с исключением разделителей /, – , //, и заменой №, с. и С. соответственно на No., p. и Pr., в конце – (in Russian).

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

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**

№ 3 (711) 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 29.03.18. Формат 70×108 $\frac{1}{16}$
Усл. печ. л. 9,63+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 2161

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