

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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 8 (716)
Август 2018 г.

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ СООРУЖЕНИЙ

Игнатьев А.В., Игнатьев В.А., Гамзатова Е.А. Анализ изгибающихся пластинок с односторонними связями по методу конечных элементов в форме классического смешанного метода	5
--	---

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ

Олейник А.И. Усиление большепролетных бескаркасных ангаров	15
Поликутин А.Э., Потапов Ю.Б., Левченко А.В. Экспериментальные исследования влияния дисперсного армирования на прочность нормальных сечений изгибающихся элементов из каутона	28
Шафрай К.А., Шафрай С.Д. Прочность сварных швов фланцевых соединений стальных конструкций	36

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Овчаренко Г.И., Ибе Е.Е., Садрашева А.О., Викторов А.В. Контактная прочность цементной фазы С-С-Н с добавками	48
Машкин Н.А., Кудяков А.И., Бартеневская Е.А. Неавтоклавный пенобетон, дисперсно-армированный минеральными и волокнистыми добавками	58
Логанина В.И., Низина Т.А., Мажитов Е.Б. Оценка пористости покрытий на основе золь силикатной краски	69

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ, ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКОЛОГИИ

Косинова Е.В. Эколо-градостроительные особенности функционирования научных центров в Сибири	75
---	----

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Вердиев С.Б. Анализ точности схем парных тахеометрических измерений относительных деформаций и привязки точек строительных объектов	82
Рафальская Т.А., Рудяк В.Я. О применимости соотношений с постоянными параметрами для расчета переменных режимов теплообменных аппаратов ...	91

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

**NEWS OF HIGHER EDUCATIONAL
INSTITUTIONS**

CONSTRUCTION

No. 8 (716)

August 2018

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

EDITORIAL BOARD

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

Responsible secretary N.V. Bitkina

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

CONTENTS

THEORY OF STRUCTURES

Ignatyev A.V., Ignatyev V.A., Gamzatova E.A. Analysis of bending plates with unilateral constraints through the finite element method in the form of classical mixed method	5
---	---

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND STRUCTURES. BASES AND FOUNDATIONS

Oleinik A.I. Strengthening of large-span frameless hangars	15
Polikutin A.E., Potapov Yu.B., Levchenko A.V. Experimental research of influence of disperse reinforcing on durability of normal sections of the bent elements from a rubcon	28
Shafray K.A., Shafray S.D. Strength of welds flanges steel structures	36

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

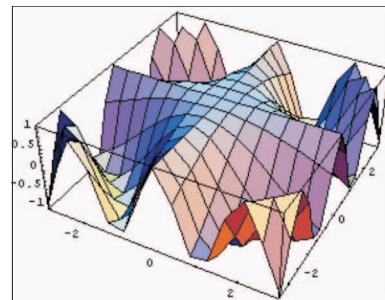
Ovcharenko G.I., Ibe E.E., Sadrashova A.O., Viktorov A.V. Contact strength of C-S-H cement phase with additives	48
Mashkin N.A., Kudyakov A.I., Bartenjeva E.A. Non-autoclaved foam concrete, dispersion-reinforced with mineral or fibrous additives	58
Loganina V.I., Nizina T.A., Mazhitov E.B. Estimation of the porosity of coatings based on the sil of silicate paint	69

SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE, TOWN PLANNING AND ECOLOGY

Kosinova E.V. Ecological and urban construction features of the functioning of scientific centers in Siberia	75
--	----

SECTION OF SCIENTIFIC METHODOLOGY

Verdiyev S.B. The analysis of accuracy of pairwise schemes of measurements with total stations of relative deformations and links of points of construction objects	82
Rafalskaya T.A., Rudyak V.Ya. On the applicability of the ratios with constant parameters for calculation of variable modes of heat exchangers	91



ТЕОРИЯ СООРУЖЕНИЙ

УДК 624.073.042

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

АНАЛИЗ ИЗГИБАЕМЫХ ПЛАСТИНОК С ОДНОСТОРОННИМИ СВЯЗЯМИ ПО МЕТОДУ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ФОРМЕ КЛАССИЧЕСКОГО СМЕШАННОГО МЕТОДА*

Излагается алгоритм математического моделирования конструктивно-нелинейной задачи изгиба пластинок с односторонними дискретно расположенными связями на основе метода конечных элементов (МКЭ) в форме классического смешанного метода. Основное преимущество этой формы МКЭ – вытекающее из физической сущности разрешающих уравнений одновременное выполнение как условий равновесия узлов конечно-элементной сетки, так и совместности перемещений конечных элементов на межэлементных границах. Другим преимуществом является то, что в систему разрешающих уравнений рассматриваемой формы МКЭ входят узловые силовые нагрузки, линейные перемещения узлов (прогибы) и узловые усилия (изгибающие моменты). Не меняя структуру этих уравнений, можно принимать за неизвестные любые из перечисленных трех параметров: силового нагружения, линейного перемещения узлов (прогибы) или усилия в узловых точках (изгибающие моменты). Необходимость смены параметра нагружения возникает при анализе конструктивно-нелинейных систем с использованием процедур пошагового нагружения и смены расчетной схемы. Преимуществом алгоритма является полная информация о напряженно-деформированном состоянии системы на каждом шаге нагружения и на каждой итерации при уточнении решения на этом шаге. Алгоритм дает возможность устранять проблемы зацикливания итерационного процесса и отслеживать включение или выключение односторонних связей в процессе пошагового приращения параметра. Эффективность алгоритма показана на примере расчета прямоугольной пластиинки.

Ключевые слова: изгиб пластиинки, односторонние дискретные связи, МКЭ в форме классического смешанного метода.

Системы с односторонними связями относятся к конструктивно-нелинейным, т.е. к системам с изменяющейся в процессе нагружения, возведения или эксплуатации расчетной схемой [1–4].

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области. Проект № 18-41-340008.

Теория расчета конструкций с односторонними связями связана с общими проблемами расчета инженерных сооружений, контактирующих с односторонними основаниями разных типов [3, 5, 6].

Сложность расчета систем с односторонними связями заключается в том, что область контакта изменяется в зависимости от величины и связанной со временем последовательности приложения нагрузки [3].

Наиболее полный обзор работ, посвященных расчету систем с односторонними связями, выполнен в диссертации В.П. Алёнина [6].

Для численного решения задач расчета таких систем используется в основном традиционный метод конечных элементов (МКЭ) в перемещениях [7]. Численная реализация решений контактных задач выполняется как с использованием методов нелинейного программирования [7–9], так и инкрементальных [10–12]. Предпочтение отдается инкрементальным методам, позволяющим получить решение на любом шаге нагружения и на любом шаге по времени при динамическом расчете.

В данной работе расчет изгибаемых пластиночек с односторонними связями выполняется МКЭ в форме классического смешанного метода, алгоритм расчета по МКЭ в форме классического смешанного метода изложен в нашей работе [12].

В данной задаче используется пластинчатый конечный элемент прямоугольной формы с двенадцатью неизвестными (рис. 1, а), подробно рассмотренный в [12]. В качестве неизвестных в основной системе принимаются усилия – изгибающие моменты M_x , M_y и линейные перемещения в узлах – прогибы w .

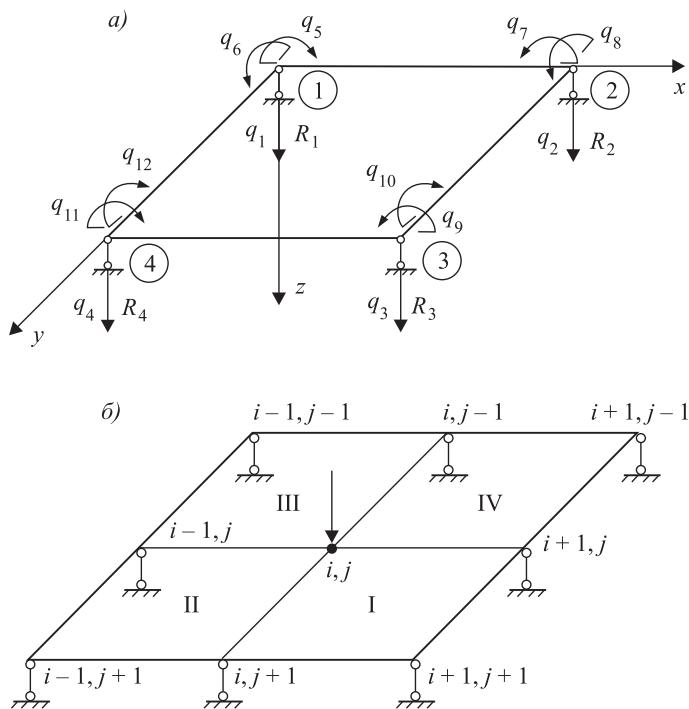


Рис. 1

Для пластиинки с двусторонними связями в контурных узлах система разрешающих уравнений для узла ij конечно-элементной сетки (рис. 1, б) имеет следующий вид:

$$R_{ij} = R_{ij}^I + R_{ij}^{II} + R_{ij}^{III} + R_{ij}^{IV} = 0$$

– уравнение равновесия,

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{ij}^{(y)} &= \varphi_{ij}^{(y)} = \Delta_5^I + \Delta_7^{II} + \Delta_9^{III} + \Delta_{11}^{IV} = 0, \\ \Delta_{ij}^{(x)} &= \varphi_{ij}^{(x)} = \Delta_6^I + \Delta_8^{II} + \Delta_{10}^{III} + \Delta_{12}^{IV} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

– уравнения совместности углов поворота нормали к поверхности пластиинки в узле ij относительно осей Oy и Ox соответственно.

Для всей пластиинки система разрешающих уравнений в матричной форме имеет следующий вид

$$[D] \begin{Bmatrix} q \\ \tilde{q} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} R_p \\ \Delta_p \end{Bmatrix} = 0, \quad (2)$$

где $[D] = \begin{bmatrix} r & \tilde{r} \\ \tilde{\delta} & \delta \end{bmatrix}$ – матрица откликов ансамбля конечных элементов, представляющих пластиинку;

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.

В развернутом виде система разрешающих уравнений (1) и значения коэффициентов матриц откликов конечных элементов, входящих в эти уравнения, приведены в [12].

При наличии во всех или некоторых узлах ij двусторонних упругих (линейных) опор, моделирующих упругое основание, величины реакций в них и перемещений по направлениям этих опорных связей формально описываются системами уравнений (1), (2). Однако в них следует учесть деформации этих упругих опор, т. е. учесть, что

$$R_{ij} = c\Delta_{ij}. \quad (3)$$

Поэтому в первом уравнении системы (1) для узла ij получаем

$$R_{ij} = R_{ij}^I + R_{ij}^{II} + R_{ij}^{III} + R_{ij}^{IV} = c\Delta_{ij}. \quad (4)$$

Изложим далее алгоритм расчета пластиинки, представленной ансамблем конечных элементов с упругими линейными односторонними опорами в узлах с жесткостью c_{ij} и зазорами Δ_{ij} между этими опорами и горизонтальной поверхностью пластиинки (рис. 2).

Для отслеживания изменения напряженно-деформированного состояния пластиинки в

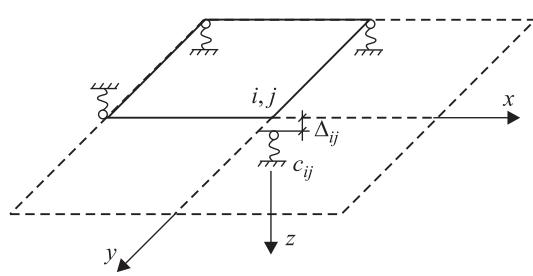


Рис. 2

процессе статического нагружения используем процедуру пошагового нагружения по параметру. При двусторонних связях таким параметром является силовая узловая нагрузка P_{ij} , к которой приводится нагрузка, распределенная по площади пластиинки.

Алгоритм расчета.

Задаем шаг по нагрузке $\Delta P_{ij} = P_{ij} / n$, где n – число шагов по нагрузке (при необходимости он может быть увеличен или уменьшен в ходе расчета).

Первый шаг по нагрузке $P_{ij}^{(1)} = \Delta P$.

1. Выполняется конечно-элементный расчет пластиинки с двусторонними опорами по контуру (первая рабочая схема) и находятся линейные перемещения (прогибы) в узлах ij заданной конечно-элементной сетки.

2. Для узлов на контуре и тех узлов, в которых поставлены упругие опоры и задана величина зазора, находятся величины прогибов w_{ij} , а для узлов на контуре величины реакций R_{i0} и R_{0j} ($i = 0, 1, \dots, n$; $j = 0, 1, 2, \dots, m$).

3. Выполняется анализ этих результатов:

а) если реакция в какой-либо из опорных связей совпадает по направлению с нагрузкой в этом узле, т.е. $R_{i0} \leq 0$ или $R_{0j} \leq 0$, то эта связь из расчетной рабочей схемы следующей итерации исключается;

б) если в узлах, где имеются упругие связи с зазорами, разность между перемещением и зазором $\Delta w_{ij} = (w_{ij} - \Delta_{ij}) \geq 0$, то эта упругая связь включается в рабочую схему следующей итерации.

4. На основе анализа принимается рабочая расчетная схема второй итерации и выполняется расчет, в результате которого проверяется выполнение условий а) и б), при которых принятая рабочая расчетная схема остается неизмененной:

а) $\Delta w_{i0} < 0$, $\Delta w_{0j} < 0$, т.е. перемещения узлов по направлениям исключенных опорных связей не приводят к их включению в рабочую схему следующей итерации;

б) $R_{i0} < 0$, $R_{0j} < 0$.

5. Если эти условия для какого-либо конкретного узла не выполняются, то соответствующая исключенная связь снова включается и учитывается в рабочей схеме следующей итерации. Итерационные циклы повторяются до совпадения рабочих расчетных схем на k -й и $(k+1)$ -й итерациях.

6. Эта рабочая расчетная схема принимается за исходную при выполнении расчета на втором шаге нагружения, т.е. при нагрузке $P_{ij}^{(2)} = \Delta P_{ij}^{(1)} + \Delta P_{ij}^{(2)}$. Расчет выполняется по тому же алгоритму, что и на первом шаге нагружения.

7. Аналогично рабочая расчетная схема $(k-1)$ -го шага нагружения принимается за исходную на k -м шаге.

Для иллюстрации алгоритма выполним тест-расчет пластиинки, опертой по контуру на жесткие односторонние шарнирные опоры.

Исходные данные: $E = 1,092 \cdot 10^7$ Н/м² – модуль упругости; $\mu = 0,3$ – коэффициент Пуассона; $h = 0,01$ м – толщина пластиинки; $a = 1,0$ м и $b = 1,0$ м – размеры сторон пластиинки вдоль осей X и Y глобальной системы координат соответственно.

Пластиинка загружена равномерно нагрузкой $q = 1$ Н/м², приведенной к узловой и показанной на рисунке 3, а.

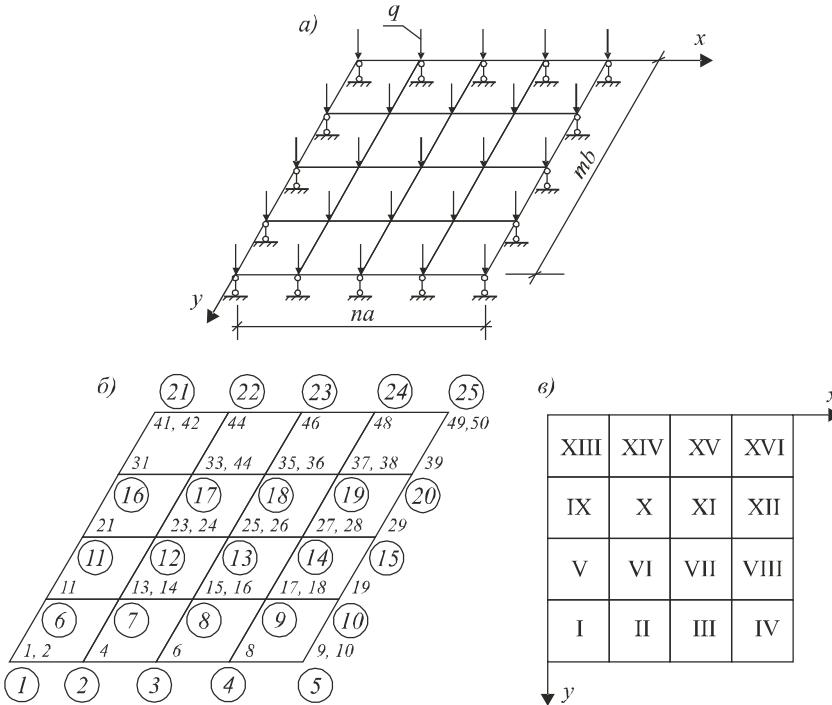


Рис. 3

Пластинку представим ансамблем конечных элементов с сеткой узлов 4×4 (рис. 3, б, в).

Физическая конечно-элементная модель рассматриваемой пластиинки представлена на рис. 3. Нумерация неизвестных (см. рис. 3, б) производится в следующей последовательности: сначала нумеруются все перемещения в узлах, затем – все изгибающие моменты, в той же последовательности узлов.

Таким образом, согласно приведенным выше правилам нумерации неизвестных мы имеем при сетке узлов (4×4) 75 неизвестных: 1–5, 6, 10, 11, 15, 16, 20, 21–25 – вертикальные линейные смещения Z_i ; 26–75 – изгибающие моменты относительно осей Ox , Oy соответственно в этих же угловых точках (рис. 3, б).

В рассматриваемой задаче необходимо найти рабочую расчетную схему пластиинки на односторонних жестких связях в контурных узлах. В соответствии с изложенным выше алгоритмом найдем последовательно рабочие расчетные схемы после каждого шага догружения $\Delta q = \frac{q}{n}$, где n – число шагов

по нагрузке (в данном примере примем $n = 10$).

Выполним расчет после первого шага нагрузления $q^{(1)} = \Delta q$.

На первой итерации все опорные связи принимаются за двусторонние.

В узлах 1, 5, 21 и 25 возникают реакции, противоположные рабочему направлению и равные 0,0207 Н. Эти опорные связи исключаются в следующей расчетной схеме.

На второй итерации выполняется проверка принятой расчетной схемы. При этом анализируются как реакции, так и перемещения в узлах на контуре. Результаты, полученные на этом шаге, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатель	Узел				
	1	2	3	6	11
<i>Вторая итерация первого шага нагружения ($\Delta q = 0,1q$)</i>					
Реакция, Н	0	-0,006407	-0,012185	-0,006407	-0,012185
Перемещение w , м	-0,0000595	0	0	0	0
<i>Первая итерация второго шага нагружения ($\Delta q = 0,2q$)</i>					
Реакция, Н	0	-0,012815	-0,024370	-0,012815	-0,024370
Перемещение w , м	-0,000119	0	0	0	0
<i>Первая итерация десятого шага нагружения ($\Delta q = q$)</i>					
Реакция, Н	0	-0,064074	-0,121852	-0,064074	-0,121852
Перемещение w , м	-0,0005949	0	0	0	0

Так как ни одно перемещение не направлено в сторону исключенных опор, и все реакции идут в рабочем направлении опор, то расчетная схема не изменяется и осуществляется переход на следующий шаг нагружения.

На первой итерации второго шага нагружения расчетная схема, полученная после первого шага, принимается за исходную, выполняется расчет и осуществляется проверка перемещений и реакций в узлах на контуре пластинки. Результаты, полученные на первой итерации этого шага, приведены в табл. 1.

Как и ранее, ни одно перемещение не направлено в сторону исключенных опор, и все реакции происходят в рабочем направлении опор. Расчетная схема не изменяется и осуществляется переход на следующий шаг нагружения.

На всех последующих шагах додрежения расчетная схема, полученная на первом шаге нагружения, не изменяется. Как показывают дальнейшие расчеты, на протяжении всех следующих шагов опоры 1, 5, 21, 25 остаются исключенными из расчета. Результаты, полученные на десятом шаге нагружения, приведены в табл. 1.

Ни одно перемещение не направлено в сторону исключенных опор, и все реакции следуют в рабочем направлении опор. Расчет системы закончен. Таким образом, в данной задаче рабочая расчетная схема найдена уже после первого шага нагружения.

Для верификации выполнено сравнение результатов расчета пластинок с сеткой конечных элементов (4×4) и (8×8), выполненных по изложенному выше алгоритму на основе метода конечных элементов в форме классического смешанного метода (КСФ МКЭ) и в ПК ЛИРА-САПР.

Таблица 2

Узел	Перемещение w , м		Δw , %
	КСФ МКЭ	ПК ЛИРА-САПР	
<i>Сетка КЭ (4×4)</i>			
1	-0,0005949	-0,0008638	31,13
7	0,00222	0,002466	9,99
8 и 12	0,003112	0,003402	8,53
13	0,004322	0,0047	8,05
<i>Сетка КЭ (8×8)</i>			
1	-0,0007231	-0,0007688	6,3
2 и 10	-0,0001954	-0,0002245	14,9
11	0,0006217	0,0006387	2,7
21	0,0022998	0,0023512	2,24
31	0,0037843	0,0038523	1,8

В табл. 2 (сетка КЭ 4×4) и (сетка КЭ 8×8) показаны перемещения характерных узлов первой четверти пластинки, имеющих не нулевые перемещения.

Нумерация узлов для сетки КЭ 8×8 приведена на рис. 4.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что при сгущении сетки конечных элементов результаты расчета методом конечных элементов в форме классического смешанного метода с помощью изложенного алгоритма сближаются с результатами ПК ЛИРА-САПР.

Выводы. 1. Показана эффективность алгоритма расчета пластинок с дискретными односторонними связями на основе альтернативного МКЭ в форме классического смешанного метода.

2. Предлагаемый алгоритм позволяет отследить включение и выключение односторонних связей в процессе пошагового нагружения, менять параметр нагружения, не изменяя при этом структуру разрешающих уравнений, вносить изменения в расчетную схему после каждого шага нагружения.

3. Пример расчета показал, что данный алгоритм не приводит к зацикливанию процесса расчета и позволяет найти рабочую расчетную схему за небольшое число итераций на каждом шаге дагружения.

4. Использование предлагаемого алгоритма дает возможность выполнить верификацию результатов, полученных другими методами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Перельмутер А.В., Кабанцев О.В. Анализ конструкций с изменяющейся расчетной схемой. М.: Изд-во СКАД СОФТ, Изд. дом АВС, 2015. 148 с.
- Перельмутер А.В. Беседы о строительной механике. М.: Изд-во СКАД СОФТ, Изд. дом АВС, 2014. 250 с.
- Пригородова З.Н. Расчет балки на сплошном упругом основании при односторонней связи балки с основанием // Промстрой НИИ проект. Сб. науч. тр. Вып. 2 (Серия гидрологическая). Владивосток, 1966. С. 85–88.
- Рабинович И.М. К задаче статически неопределеных систем с односторонними связями (доказательство единственности решения) // Исследования по теории сооружений. Вып. 10. М.: Госстройиздат, 1961.
- Аленин В.П., Игнатьев В.А. Практические методы расчета плит на одностороннем основании типа Винклера // Исследования по теории расчета и проектирования сооружений. Саратов: СПИ, 1984. 327 с.
- Аленин В.П. Итерационные методы расчета систем с внешними и внутренними односторонними связями. Дис. ... д-ра техн. наук. Волгоград, 2002. 325 с.
- Майер Дж. Квадратичное программирование и теория упруго-идеально-пластических деформаций конструкций // Механика (Сб. переводов). 1969. № 6. С. 112–128.
- Лукашевич А.А. Построение и реализация схем прямого метода конечных элементов для решения контактных задач // Изв. вузов. Строительство. 2007. № 12. С. 18–23.

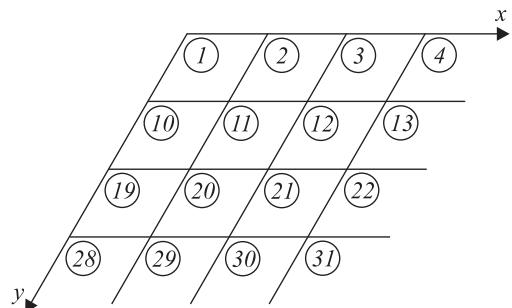


Рис. 4

9. Порталев Л.П. Расчет систем с дискретными односторонними связями – задача линейного программирования // Строительная механика и расчет сооружений, 1975. № 1. С. 59–61.
10. Игнатьев В.А., Игнатьев А.В., Бочков М.И. Расчет многопролетных балок с односторонними связями на основе МКЭ в форме классического смешанного метода // X Всероссийская конференция по механике деформируемого твердого тела, 18–22 сент. 2017 г. Самара, 2017.
11. Игнатьев А.В., Игнатьев В.А., Бочков М.И. Применение метода конечных элементов в форме классического смешанного метода и расчету систем с односторонними связями // Строительная механика и расчет сооружений. 2017. № 2. С. 52–60.
12. Игнатьев А.В., Игнатьев В.А., Гамзатова Е.А. Анализ изгибаемых пластинок, имеющих жесткие включения или отверстия, по МКЭ в форме классического смешанного метода // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 9. С. 5–14.

Игнатьев Александр Владимирович, канд. техн. наук, доц.;

E-mail: alignat70@yandex.ru

Волгоградский государственный технический университет

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

Волгоградский государственный технический университет

Гамзатова Елена Александровна, асп.

Волгоградский государственный технический университет

Получено после доработки 12.07.18

Ignatyev Alexander Vladimirovich, PhD, Ass. Professor; E-mail: alignat70@yandex.ru
Volgograd State Technical University, Russia

Ignatyev Vladimir Alexandrovich, DSc, Professor

Volgograd State Technical University, Russia

Gamzatova Elena Alexandrovna, Post-graduate Student

Volgograd State Technical University, Russia

ANALYSIS OF BENDING PLATES WITH UNILATERAL CONSTRAINTS THROUGH THE FINITE ELEMENT METHOD IN THE FORM THE OF CLASSICAL MIXED METHOD

Based on the Finite Element Method in the form of the classical mixed method, the paper presents an algorithm of the mathematical modeling of nonlinear structural problem on bending of plates with discretely located unilateral constraints. The main advantage of the given form of FEM is that both the conditions of the equilibrium of finite-element grid nodes and those of the compatibility of finite elements displacements at interelement boundaries are satisfied, which follows from the physics of the resolving equations. Another advantage is that the system of the resolving equations in the considered form of FEM includes the nodal force loads, the linear displacements of nodes (deflections) and the nodal internal forces (bending moments). Without changing the structure of the given equations, it is possible to take any of the three above-mentioned parameters as the unknown ones: the force loading parameter, the parameter of the linear displacement of nodes (deflections) or the parameter of internal forces in the nodal points (bending moments). The necessity to change the parameter of loading appears in the case of the analysis of nonlinear structural systems applying the procedures of stepwise loading and changing the design scheme. The availability of complete data on the stress-strain state of a system at each step of loading and at each iteration in the process of the solution refinement at the given step is an advantage of the algorithm. The algorithm provides a possibility for

avoiding the problem of the iterative process cycling as well as for tracking the process of involvement or disinvolve ment of the unilateral constraints in the course of stepwise increment of the parameter. The efficiency of the algorithm is shown by the example of the analysis of a rectangular plate.

Keywords: bending of plate, unilateral discrete constraints, FEM in the form of the classical mixed method.

REFERENCES

1. Perel'muter A.V., Kabantsev O.V. *Analiz konstruktsiy s izmenyayushcheysha raschetnoy skhemoy* [Analysis of structures with changing design scheme]. Moscow, 2015. 148 p. (in Russian)
2. Perel'muter A.V. *Besedy o stroitel'noy mekhanike* [Discussions about structural mechanics]. Moscow, 2014. 250 p. (in Russian)
3. Prigrodova Z.N. *Raschet balki na sploshnom uprugom osnovanii pri odnostoronnej svyazi balki s osnovaniem* [The analysis of a beam on a continuous elastic foundation with unilateral constraints of the beam with the base]. Promstroy NII proekt. Sb. nauch. tr. Vyp. 2 (Seriya gidrologicheskaya). Vladivostok, 1966. Pp. 85–88. (in Russian)
4. Rabinovich I.M. *K zadache staticheski neopredelimykh sistem s odnostoronnimi svyazyami (dokazatel'stvo edinstvennosti resheniya)* [On the problem of statically indeterminate systems with unilateral constraints (proof of the uniqueness of the solution)]. Issledovaniya po teorii sooruzheniy [Research on the theory of structures]. Vyp. 10. Moscow, 1961. (in Russian)
5. Alyonin V.P., Ignat'yev V.A. *Prakticheskie metody rascheta plit na odnostoronnem osnovanii tipa Vinklera* [Practical methods of calculation of plates on the unilateral basis of Winkler type]. Issledovaniya po teorii rascheta i proektirovaniya sooruzheniy [Research on the theory of calculation and design of structures]. Saratov, SPI, 1984. 327 p. (in Russian)
6. Alyonin V.P. *Iteratsionnye metody rascheta sistem s vneshnimi i vnutrennimi odnostoronnimi svyazyami* [Iterative methods of calculation of systems with internal and external unilateral constraints]. Volgograd, 2002. 325 p. (in Russian)
7. Majer Dzh. *Kvadratichnoe programmirovanie i teoriya uprugo-ideal'no-plasticheskikh deformatsiy konstruktsiy* [Quadratic programming and theory of elastic-ideal-plastic deformation of structures]. Mekhanika (Sb. perevodov). 1969. No. 6. Pp. 112–128. (in Russian)
8. Lukashевич A.A. *Postroenie i realizatsiya skhem pryamogo metoda konechnykh elementov dlya resheniya kontaktnykh zadach* [Construction and Realization of schemes for using the direct final elements method in solving contact problems]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2007. No. 12. Pp. 18–23. (in Russian)
9. Portaev L.P. *Raschet sistem s diskretnymi odnostoronnimi svyazyami – zadacha lineynogo programmirovaniya* [Calculation of systems with discrete unilateral constraints linear programming problem]. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy [Structural mechanics and analyses of structures]. 1975. No. 1. Pp. 59–61. (in Russian)
10. Ignat'yev V.A., Ignat'yev A.V., Bochkov M.I. *Raschet mnogoprolyotnykh balok s odnostoronnimi svyazyami na osnove MKE v forme klassicheskogo smeshannogo metoda* [Calculation of multi-span beams with one-way links based on FEM in the form of the classical mixed method]. X Vserossiyskaya konferentsiya po mekhanike deformiruemogo tvyordogo tela [X all-Russian conference on deformable solid mechanics]. Samara, 2017. (in Russian)

11. Ignat'ev A.V., Ignat'ev V.A., Bochkov M.I. Primenenie metoda konechnykh elementov v forme klassicheskogo smeshannogo metoda i rascheta sistem s odnostoronnimi svyazyami [Application of the finite element method in the form of the classical mixed method and calculation of systems with unilateral constraints]. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy [Structural mechanics and analyses of structures]. 2017. No. 2. Pp. 52–60. (in Russian)
 12. Ignat'ev A.V., Ignat'ev V.A., Gamzatova E.A. Analiz izgibaemykh platinok, imeyushchikh zhyostkie vklyucheniya ili otverstiya, po MKE v forme klassicheskogo smeshannogo metoda [Analysis of bending problem of plates with rigid inclusions or holes by the fem in the form of a classical mixed method]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 9. Pp. 5–14. (in Russian)
-

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ



УДК 624.04

А.И. ОЛЕЙНИК

УСИЛЕНИЕ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ БЕСКАРКАСНЫХ АНГАРОВ

Анализируются причины разрушения бескаркасных ангаров. Численными методами изучено влияние повышенной деформативности гофрированных оболочек на интенсивность полей напряжений и перемещений. Исследуется случай симметричного загружения ангаров вертикальной равномерно распределенной нагрузкой. Показано, что установка дополнительных стержней перпендикулярно основным гофрам в несколько раз снижает интенсивность полей деформаций и напряжений. Обсуждаются вопросы совместного использования в конструкции усиления дополнительных стержней и арочных систем.

Ключевые слова: бескаркасные ангары, анизотропные оболочки, прочность, устойчивость, усиление конструкций.

Бескаркасные ангары представляют собой гофрированные цилиндрические оболочки, которые монтируют в виде цельных дугообразных тонкостенных гнутых профилей из тонкой рулонированной оцинкованной листовой стали, толщиной 0,7–1,5 мм. Связь элементов между собой осуществляется с помощью болтов, заклепок или фальцевого соединения [1–4]. Для усиления стенки оболочки и повышения ее устойчивости применяют двойное гофрирование с основными и второстепенными гофрами, ориентированными параллельно или перпендикулярно по отношению к основным [2].

Недостатки бескаркасных ангаров связаны с их относительно низкой надежностью и высокой деформативностью, проявляющихся в районах с повышенными снеговыми нагрузками, а также при больших пролетах ангаров. Объективно, в районах с расчетными нагрузками $p = 100 \text{ кГ/м}^2$ и выше конструкции бескаркасных большепролетных ангаров (пролетами $L \geq 18 \text{ м}$) не имеют достаточных *внутренних* запасов по прочности и устойчивости и требуют *внешнего* усиления [5]. Это служит обоснованием актуальности работы.

При обрушении ангаров проявляются два *взаимосвязанных* механизма: потеря устойчивости поперечных арочных элементов, а также чрезмерные деформации и разрыв оболочки в направлении образующей цилиндрической поверхности.

В настоящее время на практике и в теоретических работах основное внимание сосредоточено на предупреждении потери устойчивости гофрирован-

ных арочных элементов, для чего, в частности, предложены элементы с двойным гофрированием, модифицированные элементы гофрирования и усиливающие ребра [1–5]. Влияние повышенной деформативности конструкции в направлении образующей изучено недостаточно.

Повышенная деформативность конструкции в продольном направлении оболочки является одним из ведущим факторов возникновения аварийных ситуаций. Для оценки деформативной способности оболочки в продольном направлении определим усредненное значение модуля деформации оболочки при переходе к ортотропной модели с гладкой стенкой. Такие расчеты выполнялись в работах [6, 7]. Некоторые типичные поперечные сечения элементов гофрирования бескаркасных ангаров приведены на рис. 1. В качестве расчетной модели используем наиболее общий случай оболочки с синусоидальным гофрированием (рис. 1, а). Отметим, что приближенно поперечные сечения (рис. 1, б-г) также можно описать в рамках синусоидальной модели.

В соответствии с [6] E^* – приведенный модуль упругости в направлении, перпендикулярном основному гофрированию, определяется формулой

$$E^* = E/k_2. \quad (1)$$

Здесь

$$k_2 = \frac{H^2}{h^2} \frac{2}{\pi} \frac{1}{\sqrt{1-a^2}} \left[\left(\frac{1}{a^2} - 1 \right) F_0 + \left(2 - \frac{1}{a^2} \right) E_0 \right] + \frac{2\sqrt{1-a^2}}{\pi} F_0;$$

$$E_0 = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-a^2 \sin^2 \alpha} d\alpha;$$

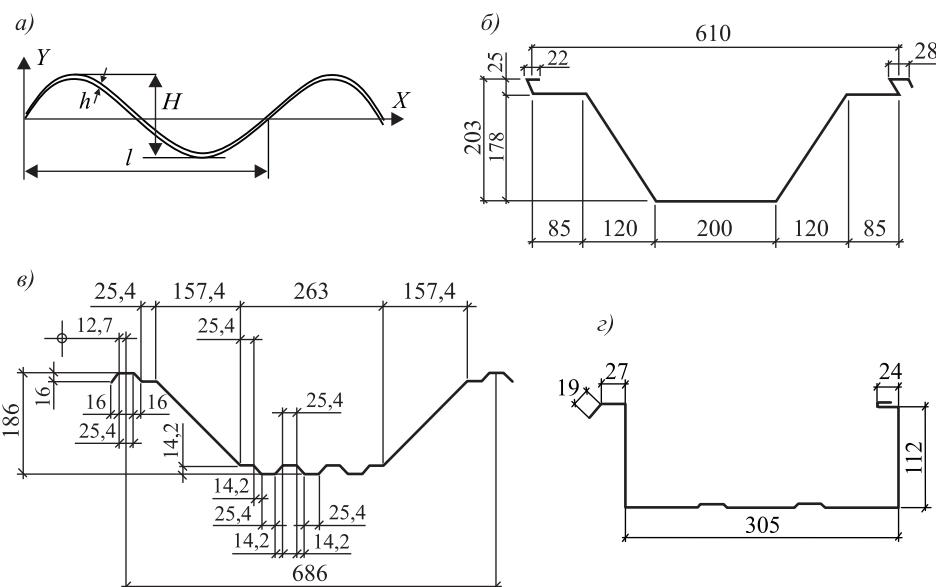


Рис. 1. Поперечные сечения некоторых типовых гнутых элементов
а – синусоидальный; *б* – трапециевидный; *в* – трапециевидный с дополнительным продольным гофрированием в направлении основных гофров; *г* – П-образный

$$F_0 = \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{1-a^2 \sin^2 \alpha}} d\alpha; \quad a = \frac{\pi H}{l} \sqrt{\frac{1}{1+\left(\frac{\pi H}{l}\right)^2}}. \quad (2)$$

Подставим (2) в (1) с учетом $E = 2 \cdot 10^8$ кН/м², $h = 1,5$ мм = 0,0015 м, $H = 0,2$ м, $l = 0,610$ м и численно определим значения полных эллиптических интегралов I, II рода E_0 , F_0 . В результате получим:

$$E^* = 5970 \text{ кН/м}^2 \ll E = 2 \cdot 10^8 \text{ кН/м}^2,$$

что определяет высокую деформативность ангара вдоль образующей.

Остановимся на закономерностях деформирования и обрушения бескаркасных ангаров, принимая во внимание $E^* \ll E$. Особенности разрушения бескаркасных ангаров хорошо иллюстрирует рис. 2, где показаны некоторые



Rис. 2. Примеры обрушения ангаров

a – бескаркасное укрытие хоккейной площадки размерами в плане 30×60 м, Верхний Услон (2009 г.), толщина листа 1,5 мм; *б* – спортивная арена в Новосибирской области; обрушение после месяца эксплуатации (толщина сугробного покрова 20 см, по проекту ангар рассчитывали на 80 см сугробного покрова); *в* – деформации торцевой стены и разрывы оболочки ангаров для строительных материалов в Подмосковье (профиль шириной 305 мм)

случаи разрушения ангаров на практике. Разрушения фактически происходили в зимнее время по симметричной форме при расчетных нагрузках по поверхности в пределах $80\text{--}150 \text{ кГ/м}^2$, что значительно меньше заявленной изготавителем предельной нагрузки порядка 400 кГ/м^2 . Отметим явное сходство повреждений для всех случаев: разрывы и значительные деформации растяжения по торцам ангаров; «заваливание внутрь» торцевых стеновых ограждений; значительное аварийное проседание оболочки в средней части. Механизм деформаций конструкции оболочки (как это наглядно видно по рис. 3, а) во многом аналогичен деформации верхнего пояса при изгибе гофрированных труб [7]. Аналогичные механизмы деформаций ангара получены при исследовании численной модели (рис. 3, б, в).

Качественный анализ показывает, что обрушение ангаров вызвано сочетанием двух основных факторов: повышенной деформативностью гофрированной оболочки в продольном направлении и потерей устойчивости в поперечных сечениях. Как правило, эти факторы взаимосвязаны. На практике причиной аварийных обрушений может выступать каждый из перечисленных факторов по отдельности или их комбинированное действие.

Детальные исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) и устойчивости бескаркасных ангаров могут быть выполнены аналитически в рамках теории анизотропных оболочек [8–10] или численно.

В данном случае исследование НДС бескаркасного ангара выполнялось численно в программе Лира 9.6. В качестве объекта исследования принятая конструкция ангара кругового очертания размерами $30\times 60 \text{ м}$ с профилем (см. рис. 1, а) без двойного гофрирования и толщиной листа $1,5 \text{ мм}$ из мяг-

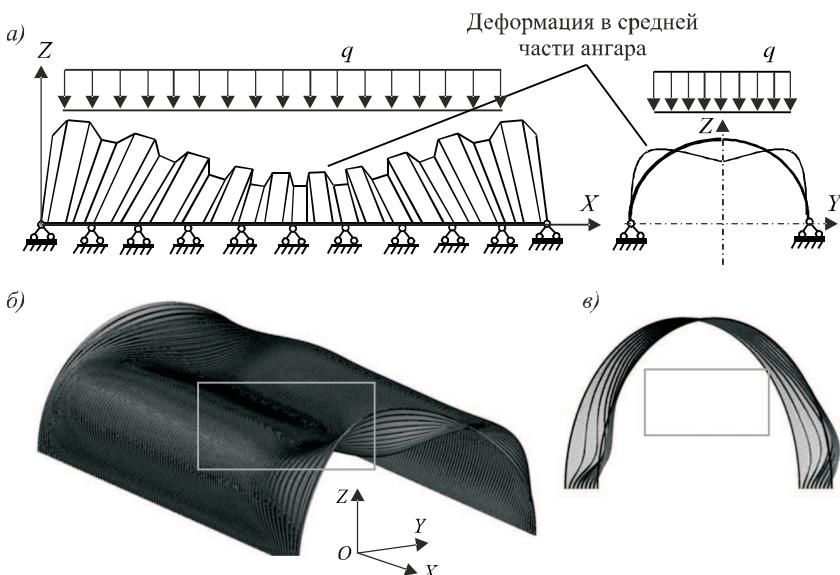


Рис. 3. Изгибная деформация гофрированной стенки ангара под действием симметричной вертикальной нагрузки

а – упрощенная схема деформирования бескаркасного ангара; б – деформация конечно-элементной модели; в – локальная потеря устойчивости стенок в опорных областях

кой стали с предельным сопротивлением $R = 230$ МПа. Рассматривался вариант симметричного загружения вертикальной равномерно распределенной нагрузкой 150 кГ/м^2 шириной 21 м по всей длине ангары 60 м. Влияние торцевых стен (диафрагм жесткости) моделировалось с помощью соответствующего задания опор. В частности, с целью исследования влияния степени подвижности торцов по левому торцу были заданы осевые закрепления в плоскости поперечного сечения ангары по осям Y , Z . По правому торцу заданы закрепления по всем координатным осям, что равносильно установке абсолютно неподвижной диафрагмы. Такое закрепление может быть реализовано на практике, например, с помощью установки контрфорсов к правой стеновой конструкции ангары в направлении оси X .

Результаты численных расчетов НДС для ангары без усилений представлены на рис. 4–6.

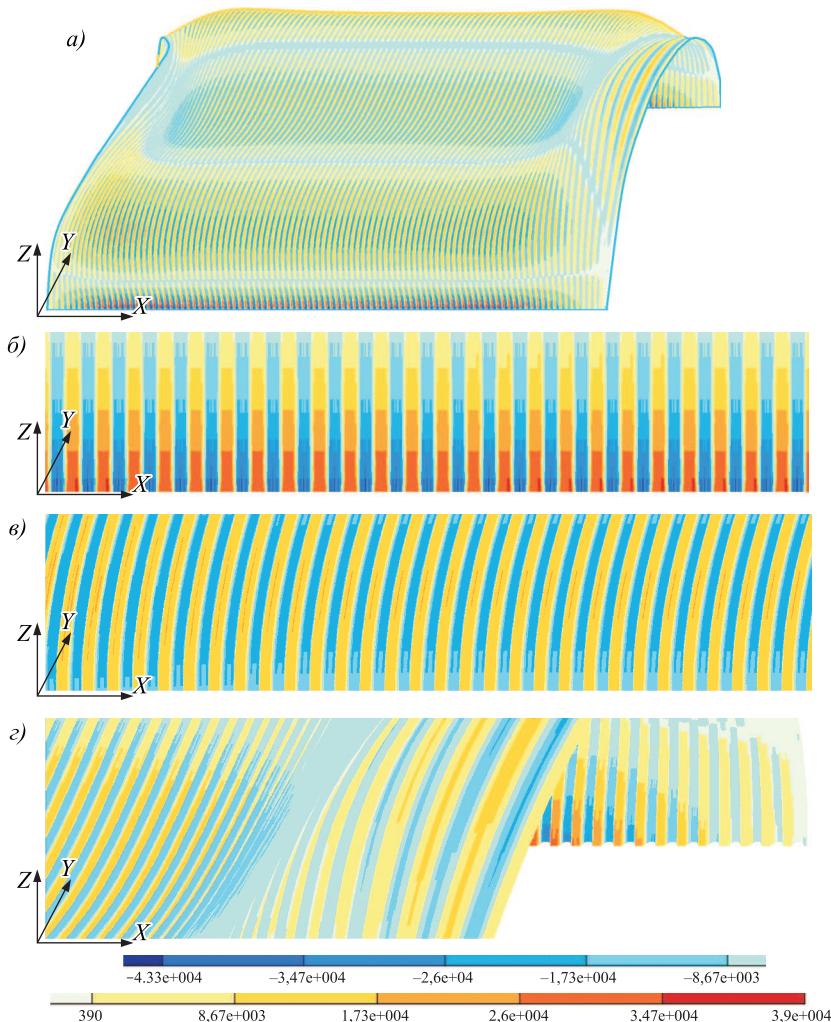


Рис. 4. Распределение продольных нормальных напряжений σ_x , т/м^2
 а – общая картина распределения нормальных напряжений σ_x ; б – в области опирания боковых сторон на фундаменты; в – по боковым поверхностям; г – в окрестности правого торца по коньку

На рис. 4, *a* приведена общая картина деформирования ангара и распределение нормальных напряжений σ_x (вдоль образующей оболочки) соответственно в области фундаментов (рис. 4, *б* – $\langle \max \sigma_x \rangle = 433$ МПа), в четверти пролета по боковым сторонам (рис. 4, *в* – $\langle \max \sigma_x \rangle = 260$ МПа $> R$) и в области максимальной стрелы подъема оболочки в торце сооружения (рис. 4, *г* – $\langle \max \sigma_x \rangle = 173$ МПа).

Характерной особенностью изополей деформаций оболочки по горизонтали (ось X) и по вертикали (ось Z) является наличие выраженной области аномально больших перемещений, скачкообразно нарастающих в областях А, Б, показанных на рис. 5. Максимальные перемещения, полученные в этих областях: $X_{\max} = 336$ мм, $Z_{\max} = 343$ мм. Следует отметить, что торцевые стены, усиливая жесткость конструкции в плоскости YOZ , вместе с тем служат источником концентрации напряжений и скачкообразного изменения деформаций по оси X . В средней части ангара в области максимальной стрелы подъема перемещения по оси X существенно меньше, чем

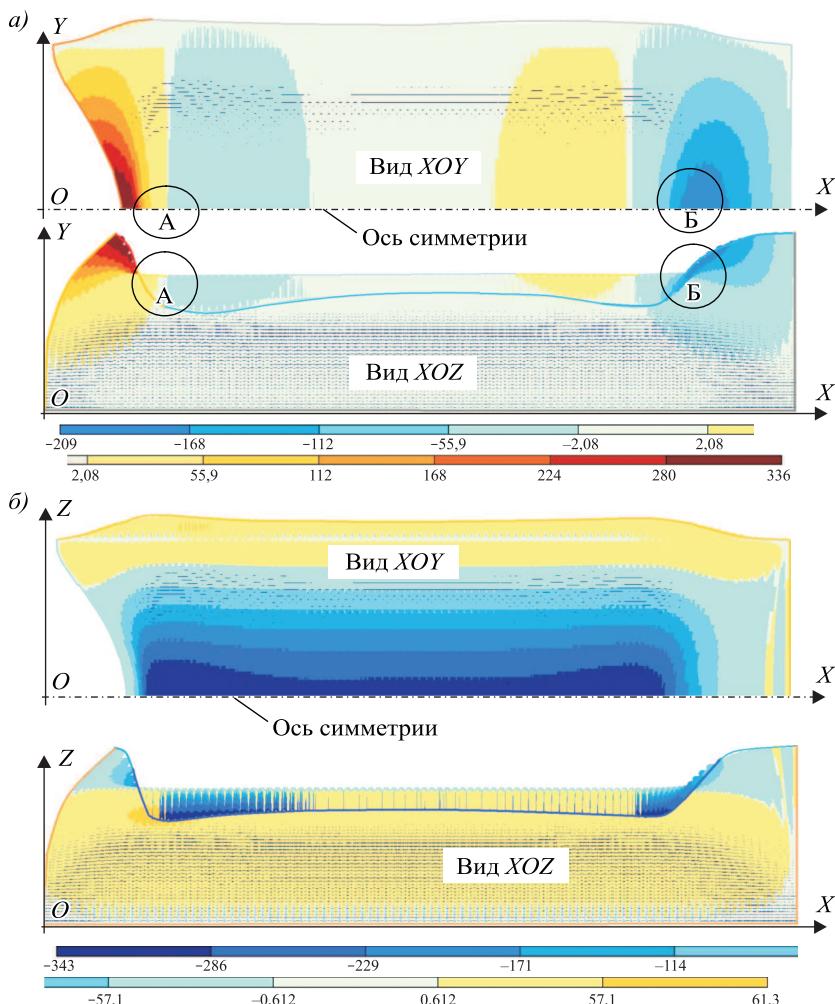


Рис. 5. Изополя перемещений по X и Z в оболочке без усилений
а – изополя перемещений по X , мм; *б* – изополя перемещений по Z , мм

в окрестности торцевых стен, а по оси Z – остаются близкими к максимальным, образуя своеобразную деформационную впадину. Полученные в расчете интенсивности касательных напряжений существенно ниже уровня предельно допустимых значений. Наличие неподвижной диафрагмы жесткости по правому торцу здания приводит к незначительному смещению правого края деформационной впадины внутрь ангары, однако общий характер деформаций не меняется.

Расчеты показали (см. рис. 6), что при заданной вертикальной нагрузке уровень нормальных напряжений σ_y в стенке не превышает предельного сопротивления материала, причем $\sigma_y < \sigma_x$. Следует отметить также, что закрепление правого торца оболочки по всем координатным осям не улучшает ситуацию: область скачка в напряжениях только смещается влево при прежнем характере деформаций. Результаты численных расчетов подтвердили очевидную слабость конструкции ангары по напряжениям и деформациям в направлении оси X , что обуславливает целесообразность усиления конструкции.

Главной задачей разработки конструкции усиления являлось снижение интенсивности полей НДС оболочки, что косвенно способно повлиять на устойчивость стенки оболочки и исключить ее разрывы.

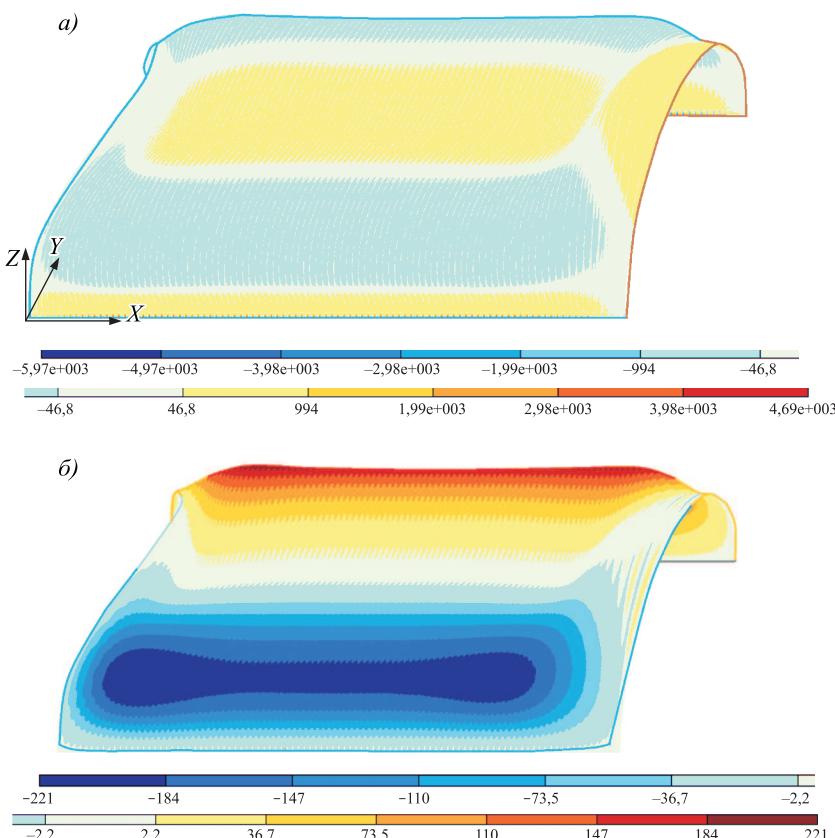


Рис. 6. Изополя σ_y и Y в стенке ангары без усиления
а – изополя напряжений σ_y , t/m^2 , в оболочке без усиливаний; б – изополя перемещений по оси Y , мм, в оболочке без усиливаний

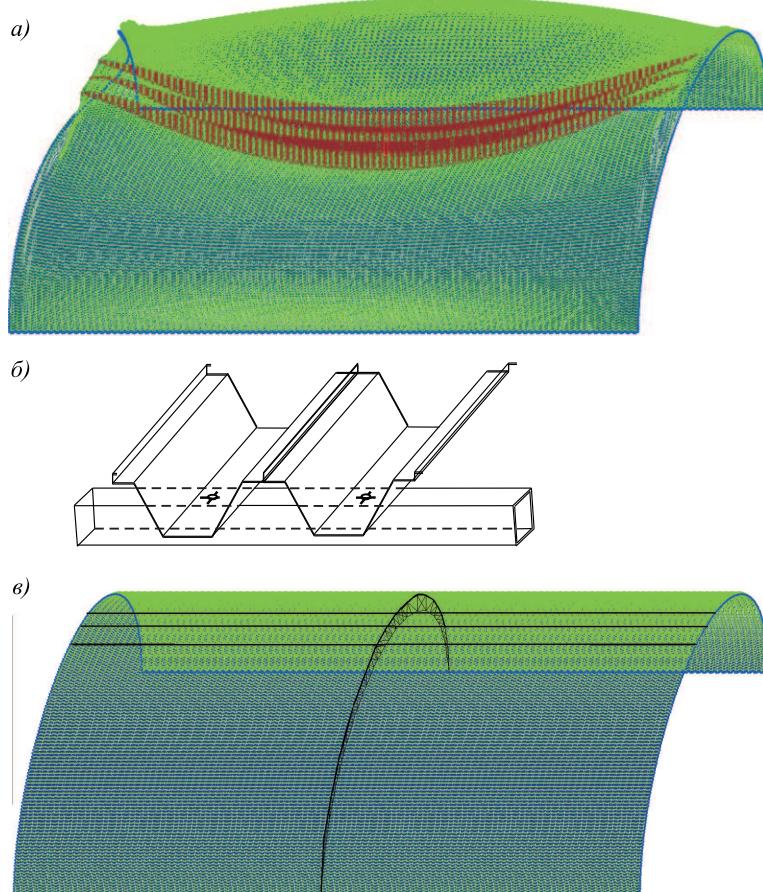


Рис. 7. Варианты усиления ангара

а – усиление стенки тремя продольными стержнями по всей длине ангара (эпюры продольных сил в усиливающих стержнях; *б* – соединение гофрированных элементов со стержнями усиления; *в* – усиление стержнями и аркой в середине ангара

Наиболее перспективным оказалось использование внешнего усиления с помощью трех продольно ориентированных стержней из труб квадратного профиля $\square 100 \times 4$, установленных с шагом 2 м по всей длине оболочки и перекрывающими указанную деформационную «яму» между областями А, Б (рис. 7, *а*). На рис. 7, *б* показан способ соединения дополнительных стержней и гофрированной стенки ангара. В отмеченных выше опасных областях, в которых вероятен разрыв швов, значительно сглажены скачки в перемещениях (рис. 8): $X_{\max} = 115$ мм, $Z_{\max} = 203$ мм. На рис. 7, *а* показан вид эпюры сжимающей силы в дополнительных стержнях. Максимальное значение сжимающей силы достигается в средней части по длине ангара: $N_{\max} = -418$ кН, при этом нормальные напряжения в усиливающих стержнях близки к предельно допустимым. Кроме того, создаются предпосылки потери устойчивости этих стержней.

Максимальную эффективность усиления и снижения усилий в дополнительных стержнях обеспечивает добавление в середине ангара арочной фермы из квадратных труб $\square 60 \times 40 \times 4$ (рис. 7, *в*). Систему из стержней с промежу-

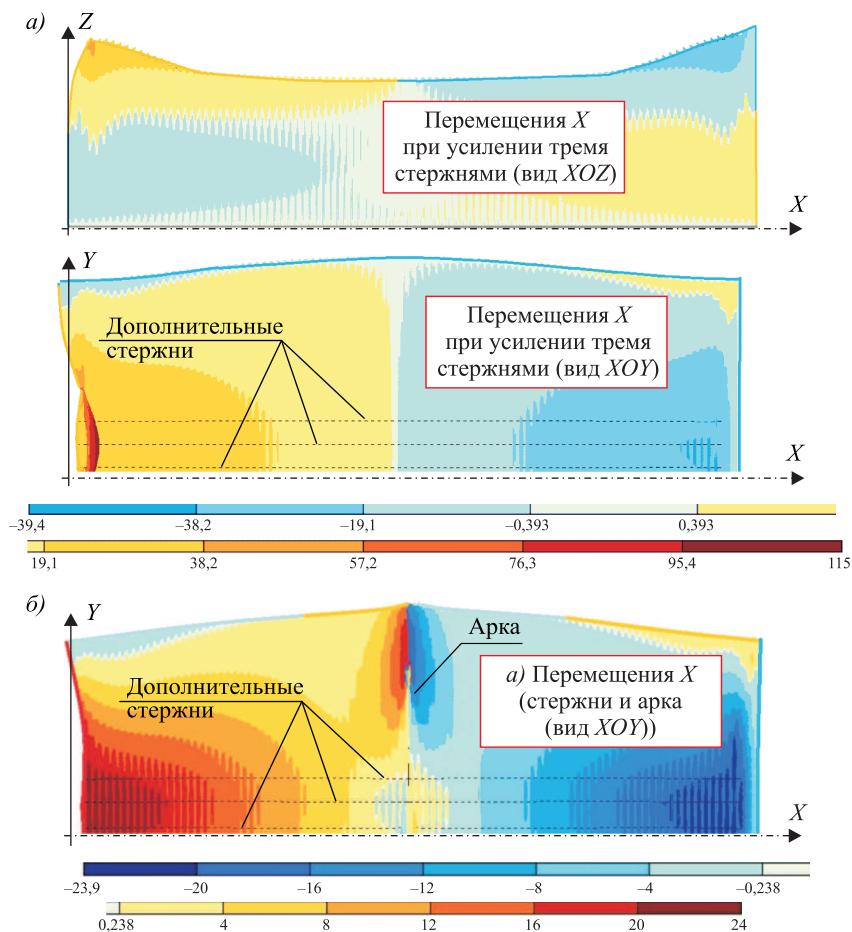


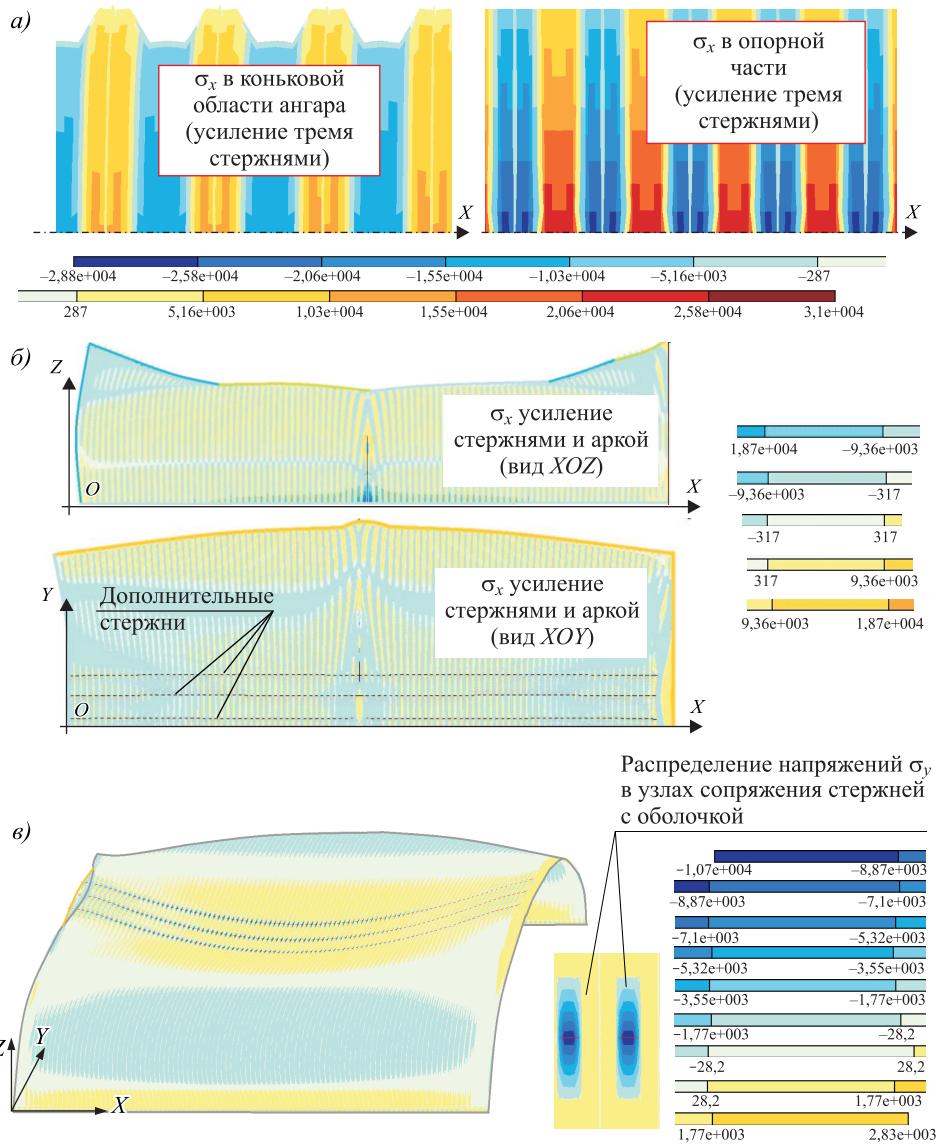
Рис. 8. Перемещения по X, мм, ангара с усилением тремя стержнями (а) и тремя стержнями и аркой (б)

точной аркой в сочетании с торцевыми стенками ангары можно рассматривать как дополнительный каркас, встроенный в конструкцию ангары.

На рис. 9, 10 и в таблице приведены данные по эффективности рассмотренных вариантов усиления (см. рис. 7, а, в).

Интенсивность полей деформаций и напряжений в конструкции ангары

Показатель	Без усиления	Усиление стержнями	Усиление стержнями и аркой
X_{\max} , мм	336	115	24
Z_{\max} , мм	343	203	95,7
Y_{\max} , мм	221	136	71,6
σ_x в области опор ангары по боковым сторонам, МПа	433	258	187
σ_x в коньке в области деформационной ямы, МПа	260	155	93,6
σ_y , МПа	59,7	107	66,9
N_{\max} , кН	—	-418	-322

Рис. 9. Изополя напряжений σ_x , σ_y в оболочке с усилениями

а – напряжения σ_x при усилении тремя стержнями; б – напряжения σ_x , t/m^2 , при усилении тремя стержнями и аркой; в – напряжения σ_y , t/m^2 , при усилении оболочки стержнями

Анализ данных таблицы показывает, что рассматриваемые варианты усиления эффективно снижают интенсивности полей деформаций по X и напряжений σ_x , однако они не влияют на интенсивность нормальных напряжений σ_y и, как следствие, не повышают устойчивость арочных элементов в поперечном сечении ангара. Следовательно, для обеспечения устойчивости ангара в плоскостях YOZ целесообразно применение двойного гофрирования (см. рис. 1, в), модифицированных профилей и использование дополнительных ребер из холодногнутых элементов [2, 4]. Кроме того, повышение устойчивости ангара в поперечном направлении обеспечивает установка *внешних* дополнительных арок, связанных с усиливающими стержнями.

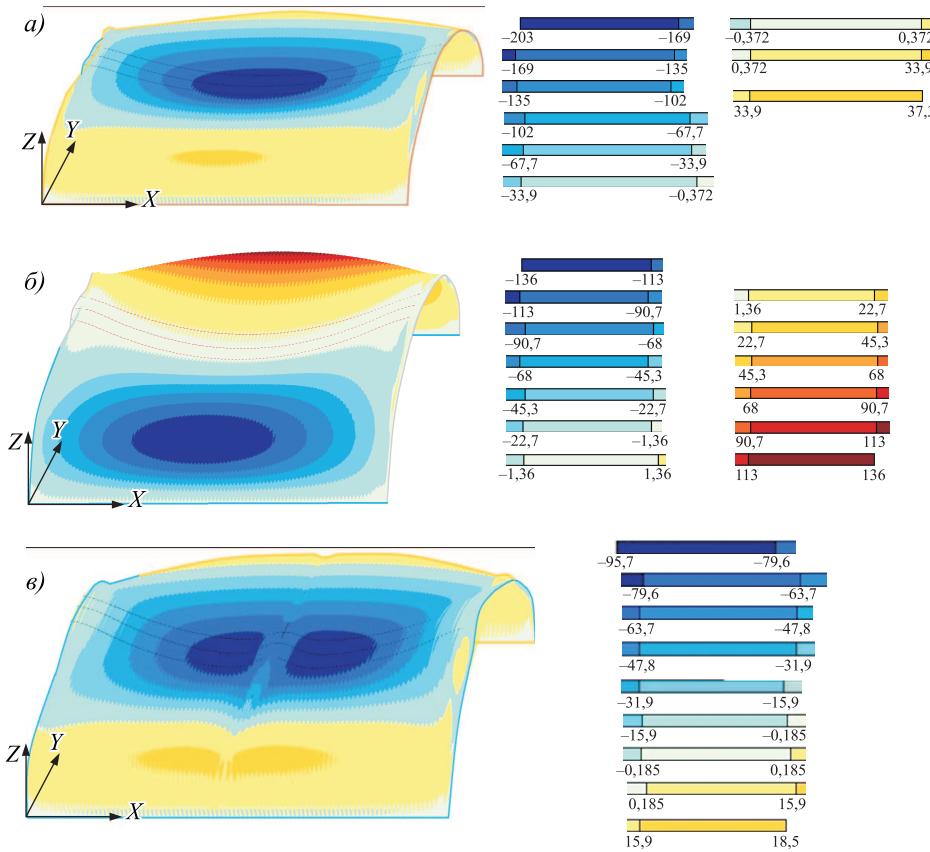


Рис. 10. Изополя перемещений оболочки по осям Z , Y ангара с усилением
а – изополя перемещений по оси Z , мм, оболочки с усилением тремя продольными стержнями;
б – изополя перемещений по Y , мм, оболочки с усилением тремя продольными стержнями;
в – изополя перемещений по Z , мм, ангара с усилением продольными стержнями и аркой

Выводы. 1. Конструкция усиления должна быть комплексной и включать в себя внешние конструктивные элементы, усиливающие оболочку в направлении образующей и применение профилей с повышенной жесткостью стенки и установкой ребер жесткости для поперечных арок.

2. Для большепролетных ангаров, строящихся в регионах со значительными снеговыми нагрузками, целесообразно использовать *внешнее усиление*. Конструкция *внешнего* усиления может иметь только горизонтальные стержни, установленные вдоль образующей цилиндрической поверхности в области максимальной стрелы подъема ангаря и соединенные с каждым из гофрированных элементов. Число стержней, сечение и шаг их установки должны быть определены расчетом. Такое усиление позволяет значительно повысить жесткость конструкции покрытия и способность к перераспределению усилий.

3. Внешнее усиление стержнями может быть дополнено одной или несколькими плоскими или пространственными арочными конструкциями, установленными с равным шагом по длине оболочки.

4. Введение элементов *внешнего* усиления в сочетании с применением гнутых профилей с двойным гофрированием позволяет практически полно-

стью исключить возможность обрушения и снимает ограничения по пролетам и нагрузкам.

5. Введение элементов усиления незначительно удорожает стоимость сооружения, позволяет значительно расширить область применения бескаркасных ангаров и гарантировать безаварийность подобных конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Липленко М.А., Айрумян Э.Л. Особенности работы бескаркасных арочных покрытий из стальных холодногнутых профилей // Пром. и гражд. стр-во. 2011. № 6. С. 42–44.
2. Карманов И.В., Зверев В.В., Жидков К.К., Поздоров А.В. Конструктивные решения бескаркасных арочных зданий. Современное состояние и перспективы развития // Строительная механика и расчет сооружений. 2015. № 5. С. 58–62.
3. Айрумян Э.Л., Беляев В.Ф. Эффективные холодногнутые профили из оцинкованной стали – в массовое строительство // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2005. № 5. С. 10–17.
4. Липленко М.А., Кунин М.В., Володин М.В. Экспериментальные исследования профиля гофрированного настила нового типа // Строительная механика и расчет сооружений. 2015. № 6. С. 67–76.
5. Кузнецов И.Л., Исаев А.В., Гимранов Л.Р. Причины обрушения бескаркасного арочного сооружения пролетом 30 м // Изв. Казан. гос. архитектурно-строит. ун-та. 2011. № 4. С. 166–170.
6. Пономарев С.Д., Андреева Л.Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. М.: Машиностроение, 1980. 326 с.
7. Аксельрад Э.Л. Гибкие оболочки. М.: Наука, 1976. 376 с.
8. Амбарцумян С.А. Общая теория анизотропных оболочек. М.: Наука, 1974. 448 с.
9. Бидерман В.Л. Механика тонкостенных конструкций. Статика. М.: Машиностроение, 1977. 488 с.
10. Алфутов Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. М.: Машиностроение, 1978. 312 с.

Олейник Александр Иванович, д-р техн. наук, доц.;

E-mail: aoleinik@mail.ru

Рудненский индустриальный институт, Казахстан

Получено после доработки 02.07.18

Oleinik Alexander Ivanovich, DSc, Ass. Professor; E-mail: aoleinik@mail.ru

Rudny Industrial Institute, Kazakhstan

STRENGTHENING OF LARGE-SPAN FRAMELESS HANGARS

The causes of destruction of frameless hangars are analyzed. Numerical methods examines the impact of increased deformability of the shirred casing on the intensity of the fields of stresses and displacements. The case of symmetrical loading of the hangar by a vertical uniformly distributed load is investigated. It is shown that the installation of additional rods perpendicular to the main corrugations reduces the intensity of deformation and stress fields

several times. The issues of joint use of additional rods and arch systems in the construction of reinforcement are discussed.

Key words: frameless hangars, anisotropic shells, strength, stability, strengthening of structures.

REFERENCES

1. Liplenko M.A., Ayrumyan E.L. Osobennosti raboty beskarkasnykh arochnykh pokrytiy iz stal'nykh kholodnognutikh profiley [Features of work of frameless arch coverings from steel cold-formed profiles]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and civil engineering magazine]. 2011. No. 6. Pp. 42–44. (in Russian)
2. Karmannov I.V., Zverev V.V., Zhidkov K.K., Podzorov A.V. Konstruktivnye resheniya beskarkasnykh arochnykh zdaniy. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya [Structural solutions of frameless arched buildings. Current state and development prospects]. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy [Structural mechanics and analysis of constructions]. 2015. No. 5. Pp. 58–62. (in Russian)
3. Ayrumyan E.L., Belyaev V.F. Effektivnye kholodnognutye profili iz otsinkovannoy stali – v massovoe stroitel'stvo [Effective cold-formed profiles made of galvanized steel in the massive construction]. Montazhnye i spetsial'nye raboty v stroitel'stve [Installation and special works in construction]. 2005. No. 5. Pp. 10–17. (in Russian)
4. Liplenko M.A., Kunin M.V., Volodin M.V. Eksperimental'nye issledovaniya profilya gofrirovannogo nastila novogo tipa [An experimental study of the profile of corrugated flooring is a new type]. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy [Structural mechanics and analysis of constructions]. 2015. No. 6. Pp. 67–76. (in Russian)
5. Kuznetsov I.L., Isaev A.V., Gimranov L.R. Prichiny obrusheniya beskarkasnogo arochnogo sooruzheniya prolyotom 30 m [The reasons for the collapse of frameless arched structure with a span of 30 m]. Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkitektурno-stroitel'nogo universiteta [News of Kazan state University of architecture and construction]. 2011. No. 4. Pp. 166–170. (in Russian)
6. Ponomaryov S.D., Andreeva L.E. Raschet uprugikh elementov mashin i priborov [Calculation of elastic elements of machines and devices]. Moscow, 1980. 326 p. (in Russian)
7. Aksel'rad E.L. Gibkie obolochki [Flexible shell]. Moscow, 1976. 376 p. (in Russian)
8. Ambartsumyan S.A. Obshchaya teoriya anizotropnykh obolochek [General theory of anisotropic shells]. Moscow, 1974. 448 p. (in Russian)
9. Biderman V.L. Mekhanika tonkostennikh konstruktsiy. Statika [Mechanics of thin-walled structures. Statics]. Moscow, 1977. 488 p. (in Russian)
10. Alfutov N.A. Osnovy rascheta na ustoychivost' uprugikh sistem [Bases of calculation on stability of elastic systems]. Moscow, 1978. 312 p. (in Russian)

УДК 624.072.2.011.7:678.7

А.Э. ПОЛИКУТИН, Ю.Б. ПОТАПОВ, А.В. ЛЕВЧЕНКО

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОГО АРМИРОВАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ НОРМАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ КАУТОНА

Представлены результаты исследований прочности нормальных сечений изгибаемых элементов строительных конструкций, выполненных из эффективного, обладающего практически универсальной химической стойкостью полимербетона – каучукового бетона (каутона). При этом, помимо традиционного стержневого армирования используется фибровое армирование (полученное из отходов металлокорда шинного производства), позволяющее увеличить прочность, в том числе растянутой зоны конструкций. Для изучения прочности нормальных сечений были изготовлены балки прямоугольного поперечного сечения из каутона, фиброкаутон и испытаны на чистый изгиб. Описана методика экспериментальных исследований изгибаемых элементов смешанного армирования. Представлены результаты испытаний балок на чистый изгиб. Установлено, что при добавлении фибрового армирования наблюдается увеличение значений разрушающего изгибающего момента до 30 %. На основании анализа полученных при испытании значений нормальных напряжений, возникающих в крайнем сжатом волокне балки при поперечном изгибе, установлено, что их значения с увеличением процента продольного армирования возрастают и практически достигают предела прочности каутона, а также фиброкаутона на сжатие. По результатам исследований в качестве изгибаемых конструкций рекомендуются фиброкаутоновые балки ввиду более высоких прочностных показателей, а также более эффективного использования материалов конструкции.

Ключевые слова: каутон, фибра, балка, нормальные сечения, прямоугольное сечение, прочность, нормальные напряжения.

Изучением свойств каучуковых бетонов с дисперсным армированием и без него занимались авторы работ [1–5]. Особой чертой каутона является практически универсальная химическая стойкость, подробные показатели коэффициента химической стойкости представлены в табл. 1. Среди положительных свойств каутона нельзя не отметить его высокую адгезию к материалам различного рода. В процессе исследования «поведения» каутона в строительных конструкциях различного типа была подтверждена эффективность применения конструкций, изготовленных на его основе [6–11]. Предпосылки для исследования изгибаемых элементов на основе фиброкаутона изложены в работе [12]. Прочностные характеристики фиброкаутона: прочность при сжатии – 70–90 МПа; прочность при растяжении – 10–20 МПа; модуль упругости – 25 000–27 000 МПа; коэффициент Пуассона – 0,2–0,3.

С целью изучения прочности нормальных сечений армированных каутоновых изгибаемых элементов прямоугольного поперечного сечения,

Таблица 1. Коэффициенты химической стойкости каутона [4]

Вид агрессивной среды	Коэффициент химической стойкости	
	через 1 год экспонирования	прогнозируемый через 10 лет
20%-й раствор серной кислоты	0,95	0,95
3%-й раствор азотной кислоты	0,8	0,7
10%-й раствор лимонной кислоты	0,9	0,8
20%-й раствор едкого натрия	0,95	0,95
10%-й раствор едкого калия	0,8	0,65
Насыщенный раствор хлористого натрия	0,9	0,8
Дизельное топливо	0,95	0,95
Вода	1	0,99

были испытаны на чистый изгиб балки с фибральным армированием и без него. В качестве продольной арматуры были использованы стержни класса А500С, в качестве поперечной – Вр500, диаметром 5 мм, с шагом 50 мм. Фибровое армирование представлено стальными волокнами диаметром 0,3 мм и длиной 30 мм (т. е. с отношением диаметра к длине волокна 1:100), полученными из отходов металлокорда шинного производства и расположенным хаотично по всему объему экспериментальных балок. Процент продольного армирования назначен из соображений разрушения изгибающего элемента по расстоянной зоне, так как балки с процентом продольного армирования равным 6,38 в предварительных исследованиях разрушались по сжатой зоне, следовательно, рекомендуемым процентом армирования для изгибаемых элементов являются значения, лежащие в диапазоне от 0 до 4,9. Параметры образцов-балок: длина – 1400 мм; ширина – 60 мм; высота – 120 мм; количество и диаметр стержней продольной арматуры – 0; 1Ø8; 1Ø10; 1Ø12; 2Ø10; 2Ø12; 2Ø14 мм; продольное стержневое армирование – 0; 0,8; 1,25; 1,8; 2,5; 3,6; 4,9 %.

Схема загружения и сечение балок представлены на рис. 1.

В результате испытаний экспериментальных образцов, изготовленных из каутона с дисперсным армированием и без него, было установлено, что за разрушающую следует принимать нагрузку, когда напряжения в арматуре достигли предела текучести, в балке без продольного стержневого армирования – нагрузку перед образованием первой трещины, так как хрупкого разрушения по сжатой зоне на всем интервале варьирования процентом продольного армирования не наблюдалось. На рис. 2 представлен общий вид балки, изготовленной из каутона, до и после испытания.

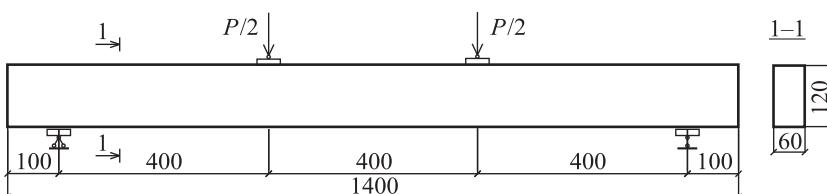


Рис. 1. Схема загружения и сечение балок

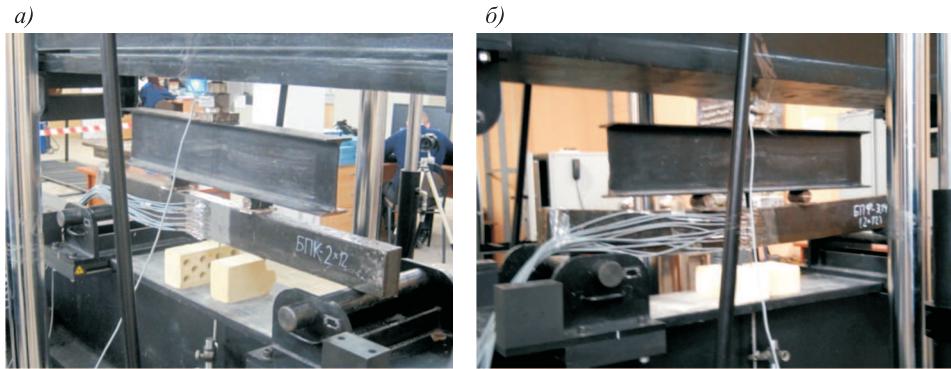


Рис. 2. Общий вид балки до (а) и после испытания (б)

Значения разрушающего изгибающего момента в результате исследований каутоновых и фиброкаутоновых изгибаемых элементов сведены в табл. 2. На основании испытаний контрольных образцов к каждой серии балок были получены данные по пределу прочности на сжатие и на растяжение, значения которых также приведены в табл. 2.

С целью определения нормальных напряжений по высоте сечения изгибаемого элемента были наклеены тензодатчики. В табл. 3 приведены значения напряжений, возникающие в крайнем сжатом волокне полимербетона в зависимости от процента продольного стержневого армирования, а также доля действующих напряжений от предела прочности на сжатие.

Таблица 2. Результаты эксперимента

Шифр балки	Диаметр стержней	Армирование, %	M_u , кН · м	R_k , МПа	R_{kt} , МПа
БПФ-0	0	0	2,616	87,5	13,8
БПФ-8	8	0,8	3,78	85	10,6
БПФ-10	10	1,25	5,588	84	9,5
БПФ-12	12	1,8	6,772	84	9,5
БПФ-2×10	2×10	2,5	8,774	85	10,6
БПФ-2×12	2×12	3,6	11,282	87,5	13,0
БПФ-2×14	2×14	4,9	15,1	85	10,5
БПК-0	0	0	2,1	80	9
БПК-8	8	0,8	3,06	81	10,2
БПК-10	10	1,25	4,28	81	10,2
БПК-12	12	1,8	5,6	80	10,5
БПК-2×10	2×10	2,5	7,818	75	9
БПК-2×12	2×12	3,6	10,3	79	10,5
БПК-2×14	2×14	4,9	14,0	80	9,5

Примечание. Расшифровка шифра БПФ-0: Б – вид элемента, в нашем случае балка; П – вид поперечного сечения, в нашем случае прямоугольное; Ф – материал, из которого изготовлен изгибаемый элемент (фиброкаутон, каутон); число указывает на диаметр продольного армирования и число стержней.

Таблица 3. Напряжения, возникающие в сжатой зоне бетона

Шифр балки	Предел прочности на сжатие R_k , МПа	Напряжения в крайнем сжатом волокне σ , МПа	σ/R_k , МПа/МПа
БПФ-0	87,5	21,58	0,25
БПФ-8	85	47,45	0,56
БПФ-10	84	49,27	0,58
БПФ-12	84	53,59	0,63
БПФ-2×10	85	67,11	0,79
БПФ-2×12	87,5	78,89	0,93
БПФ-2×14	85	84,7	0,99
БПК-0	80	15,66	0,20
БПК-8	81	30,75	0,38
БПК-10	81	44,69	0,55
БПК-12	80	55,5	0,69
БПК-2×10	75	58,36	0,78
БПК-2×12	79	70,41	0,89
БПК-2×14	80	79,3	0,99

Анализ напряжений, возникающих в сжатой зоне нормальных сечений изгибаемого элемента, показал, что практически во всех испытанных балках они не достигают предела прочности на сжатие. Однако для балки, армированной двумя стержнями диаметром 14 мм, напряжения в сжатой зоне практически равны значению предела прочности, полученного по контрольным образцам, при этом признаков разрушения опытного образца по сжатой зоне не наблюдалось. Данный факт говорит о возможном увеличении прочности материала в теле конструкции. Очевидно, что с увеличением процента продольного армирования напряжения в сжатой зоне растут, их доля меняется от 0,25 до 0,99 в фиброкаутоне и от 0,2 до 0,99 в каутоне. При расчете по I группе предельных состояний согласно п. 8.1 СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции» рекомендуется криволинейную эпюру нормальных напряжений в бетоне сжатой зоны заменять на прямоугольную эпюру со значениями напряжений, равными расчетному сопротивлению бетона, т.е. предельному значению. Что, по мнению авторов данной статьи, нецелесообразно для высокопрочных бетонов, в частности каутона, с малым процентом армирования, предпосылками для данного утверждения также являются исследования [13, 14], а также пп. 6.1.19–22 того же свода правил при расчете железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели. Помимо меньших значений напряжений в крайнем сжатом волокне по сравнению с пределом прочности на сжатие стоит отметить, что отношение нормальных напряжений к пределу прочности на сжатие, представленное в табл. 3, не учитывает фактическое очертание эпюр напряжений в сжатой зоне.

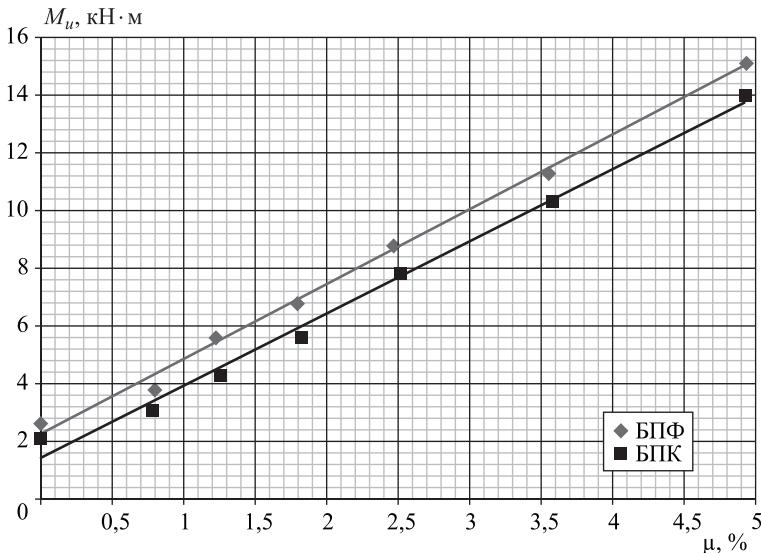


Рис. 3. Зависимость изгибающего момента от процента продольного армирования

По результатам экспериментальных исследований построен график зависимости разрушающего (предельного) изгибающего момента, возникающего в экспериментальной балке, от процента продольного армирования (рис. 3).

Анализ зависимостей, представленных на рис. 3, показал, что разрушающий изгибающий момент на всем интервале варьирования процентом продольного армирования возрастает, практически, на одну и ту же величину $\sim 0,95$ кН·м. Если рассматривать долю влияния фибрового армирования на прочность нормальных сечений, то с увеличением процента продольного армирования она уменьшается.

Заключение. Впервые проведены исследования влияния дисперсного армирования на прочность изгибаемых элементов, изготовленных из каучукового бетона.

Установлено, что разрушающий изгибающий момент возрастает линейно при увеличении процента продольного армирования. Графики зависимости разрушающего изгибающего момента от процента продольного армирования для каутоновых и фиброкаутоновых балок практически параллельны, в связи с чем можно говорить о повышении класса по прочности используемого материала (каутона). При добавлении фибрового армирования наблюдается увеличение значения разрушающего изгибающего момента на величину до 30 %, однако с ростом процента продольного армирования разница между значениями M_u сокращается до 8 % (оставляя абсолютную разницу неизменной).

Значения напряжений в крайнем сжатом волокне изгибаемых элементов с повышением процента продольного армирования увеличиваются и практически достигают предела прочности каутона или фиброкаутона на сжатие ($\sigma/R_k = 0,99$).

К использованию в качестве изгибаемых конструкций рекомендуются фиброкаутоновые балки, ввиду более высоких прочностных показателей, а

также более эффективного использования материалов конструкции (приближение прочности растянутой зоны к прочности сжатой), особенно при малых значениях процента продольного армирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борисов Ю.М., Панфилов Д.В., Кащанов С.В., Юдин Е.М. Дисперсно-армированные строительные композиты // Строит. механика и конструкции. 2010. № 2. С. 32–37.
2. Панфилов Д.В. Дисперсно-армированные строительные композиты на основе полибутиденинового олигомера: Дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2004. 188 с.
3. Переялский О.Е. Строительные композиты на основе полибутидениновых олигомеров для защиты от радиации: Дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2006. 174 с.
4. Чмыхов В.А. Сопротивление каучукового бетона действию агрессивных сред: Дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2002. 224 с.
5. Макарова Т.В. Эффективные строительные композиты на основе жидкого стереорегулярного полибутиденинового каучука: Дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 1998. 234 с.
6. Нгуен Фан Зуй. Двухслойные каутоно-бетонные изгибающие элементы строительных конструкций: Дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2010. 185 с.
7. Борисов Ю.М., Поликутин А.Э., Нгуен Фан Зуй. Напряженно-деформированное состояние нормальных сечений двухслойных каутоно-бетонных изгибающих элементов строительных конструкций // Науч. вестн. ВГАСУ «Архитектура и строительство». Воронеж, 2010. № 2. С. 18–24.
8. Пинаев С.А., Франциско Савити Матиас да Фонеска. Влияние полимерцементной защиты на трещиностойкость железобетонных изгибающих элементов // Науч. вестн. ВГАСУ: Материалы межрегиональной научно-практической конференции «Высокие технологии в экологии», 2011. № 9. С. 85–88.
9. Пинаев С.А. Короткие сжатые элементы строительных конструкций из эффективного композита на основе бутадиенового полимера: Дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2001. 191 с.
10. Potapov Yu.B., Pinaev S.A., Arakelyan A.A., Vagabash A.D. Polymer-cement material for corrosion protection of reinforced concrete elements// Solid state phenomena. 2016. No. 871. P. 104–109.
11. Potapov Yu., Polikutin A., Panfilov D., Okuniev M. Comparative analysis of strength and crack resistance of normal sections of bent elements of T-sections, made of rubber concrete, cauon reinforcement and concrete // MATEC Web of Conferences. 2016. No. 73. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20167304018>.
12. Левченко А.В., Зябухин П.А., Офоркаджа Т.О. Фиброкаутон и конструкции на его основе // Научная опора Воронежской области. Воронеж, 2017. С. 197–199.
13. Филимочкина Г.И. Оценка прочности изгибающих элементов железобетонных конструкций с учетом особенностей экспериментальной диаграммы напряжений – деформаций сжатой зоны бетона: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1999. 180 с.
14. Ганага П.Н., Малин Л.Р. Совершенствование методов расчета железобетонных конструкций и снижение их металлоемкости / Ставроп. краев. произв. упр. стр-ва и эксплуатации автомоб. дорог. Ставрополь: Кн. изд-во, 1987. 152 с.

Поликутин Алексей Эдуардович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: a.pl@mail.ru
Воронежский государственный технический университет

Потапов Юрий Борисович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: apl-sc@mail.ru
Воронежский государственный технический университет
Левченко Артем Владимирович, асп.; E-mail: Alevchenko@vgasu.vrn.ru
Воронежский государственный технический университет

Получено после доработки 16.07.18

Polikutin Aleksey Eduardovich, PhD, Ass. professor; E-mail: a.pl@mail.ru

Voronezh State Technical University, Russia

Potapov Yuriy Borisovich, DSc, Professor; E-mail: apl-sc@mail.ru

Voronezh State Technical University, Russia

Levchenko Artem Vladimirovich, Post-graduate Student;

E-mail: Alevchenko@vgasu.vrn.ru

Voronezh State Technical University, Russia

EXPERIMENTAL RESEARCH OF INFLUENCE OF DISPERSE REINFORCING ON DURABILITY OF NORMAL SECTIONS OF THE BENT ELEMENTS FROM A RUBCON

The article presents the results of researches of the strength of normal sections of bending elements of building structures, made of an effective polymer concrete – rubber concrete (rubcon), which has almost universal chemical resistance. At the same time, the addition of fiber reinforcement (obtained from tire cord steel cord waste), allows to increase the strength of the beam, especially the stretched zone of structures. To study the strength of normal sections, rectangular cross-section beams were made from rubcon, fibrorubcon and tested for pure bending. The article describes the method of experimental studies of bending elements of mixed reinforcement. The results of tests on pure bending of beams are presented. It is established that with the addition of fiber reinforcement there is an increase in the value of the destructive bending moment up to 30 %. Based on the analysis obtained when testing the values of normal stresses arising in the extreme compressed fiber of the beam during transverse bending, it was found that their values with increasing percentage of longitudinal reinforcement they increase and practically reach the limit of strength of the rubcon as well as fibrorubcon compressive strength. According to research results, it is recommended to use fibrorubcon beams as bending structures due to higher strength characteristics, as well as more efficient use of materials of construction.

К e y w o r d s: rubcon, fiber, beam, normal cross-sections, rectangular cross-section, strength, stresses.

REFERENCES

1. B o r i s o v Yu.M., P a n f i l o v D.V., K a s h t a n o v S.V., Y u d i n E.M. Dispersno-armirovannye stroitel'nye kompozity [Construction dispersed reinforced composites]. Stroitel'naya mehanika i konstruktii [Structural mechanics and design]. 2010. No. 2. Pp. 32–37. (in Russian)
2. P a n f i l o v D.V. Dispersno-armirovannye stroitel'nye kompozity na osnove polibutadienovogo oligomera: Dis. ... kand. tekhn. nauk [Dispersed reinforced building composites based on polybutadiene oligomer: author. dis. ... PhD]. Voronezh, 2004. 188 p. (in Russian)
3. P e r e k a l s k i y O.E. Stroitel'nye kompozity na osnove polibutadienovykh oligomerov dlya zashchity ot radiatsii: Dis. ... kand. tekhn. nauk [Building composites based on polybutadiene oligomers for radiation protection: author. dis. ... PhD]. Voronezh, 2006. 174 p. (in Russian)

4. Chmykhov V.A. Soprotivlenie kauchukovogo betona deystviyu agressivnykh sred: dis. ... kand. tekhn. nauk [Rubber concrete resistance to aggressive environment: author. dis. ... PhD]. Voronezh, 2002. 224 p. (in Russian)
5. Makarova T.V. Effektivnye stroitel'nye kompozity na osnove zhidkogo stereoregulyarnogo polibutadienovogo kauchuka: dis. ... kand. tekhn. nauk [Effective building composites based on liquid stereoregular polybutadiene rubber: author. dis. ... PhD]. Voronezh, 1998. 234 p. (in Russian)
6. Guyen Fan Zuy. Dvukhsloynye kautono-betonnye izgibaemye elementy stroitel'nykh konstruktsiy: Dis. ... kand. tekhn. nauk [Double-layered, rubcon-concrete bending elements of building structures: author. dis. ... PhD]. Voronezh, 2010. 185 p. (in Russian)
7. Borisov Yu.M., Polikutin A.E., Nguyen Phan Duy. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie normal'nykh secheniy dvukhsloynykh kautono-betonnykh izgibaemykh elementov stroitel'nykh konstruktsiy [The Stress-strain state of normal sections of double-layered, rubcon-concrete bending elements of building structures]. Nauchnyy vestnik VGASU «Arkhitektura i stroitel'stvo» [Scientific Herald of VSACE «Architecture and construction»]. Voronezh, 2010. No. 2. Pp. 18–24. (in Russian)
8. Pinayev S.A., Francisco Saviti Mathias da Fonseca. Vliyanie polimertsementnoy zashchity na treshchinostoykost' zhelezobetonnykh izgibaemykh elementov [Effect of polymer-cement protection on the crack resistance of reinforced concrete bending elements]. Nauchnyy vestnik VGASU «Vysokie tekhnologii v ekologii» [Scientific Herald of the Voronezh state University of architecture and construction. Series: High technology. Ecology]. 2011. No. 9. Pp. 85–88. (in Russian)
9. Pinayev S.A. Korotkie szhatye elementy stroitel'nykh konstruktsiy iz effektivnogo kompozita na osnove butadienovogo polimera: Dis. ... kand. tekhn. nauk [Short compressed elements of building structures from an effective composite based on a butadiene polymer: author. dis. ... PhD]. Voronezh, 2001. 191 p. (in Russian)
10. Potapov Yu.B., Pinayev S.A., Arakelyan A.A., Barabash A.D. Polymer-cement material for corrosion protection of reinforced concrete elements. Solid state phenomena. 2016. No. 871. Pp. 104–109.
11. Potapov Yu., Polikutin A., Panfilov D., Okuniev M. Comparative analysis of strength and crack resistance of normal sections of bent elements of T-sections, made of rubber concrete, cauon reinforcement and concrete. MATEC Web of Conferences. 2016. No. 73. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20167304018>.
12. Levchenko A.V., Zubukhin P.A., Oforkaja T.O. Fibrokauton i konstruktsii na ego osnove [Fiberrubcon and construction based on it]. Nauchnaya opora Voronezhskoy oblasti [Scientific support of the Voronezh region]. Voronezh, 2017. Pp. 197–199. (in Russian)
13. Filimoshkina G.I. Otsenka prochnosti izgibaemykh elementov zhelezobetonnykh konstruktsiy s uchetom osobennostey eksperimental'noy diagrammy napryazheniy – deformatsiy szhatoy zony betona: Dis. ... kand. tekhn. nauk [Evaluation of the strength of the bending elements of reinforced concrete structures taking into account the features of the experimental stress – strain diagram of the compressed zone of concrete: author. dis. ... PhD]. Moscow, 1999. 180 p. (in Russian)
14. Ganaga P.N., Maiyan L.R. Sovremenstvovanie metodov rascheta zhelezobetonnykh konstruktsiy i snizhenie ikh metalloemkosti [Improvement of methods of calculation of reinforced concrete structures and reduction of their metal content]. Stavropol, 1987. 152 p. (in Russian)

УДК 624.014

К.А. ШАФРАЙ, С.Д. ШАФРАЙ

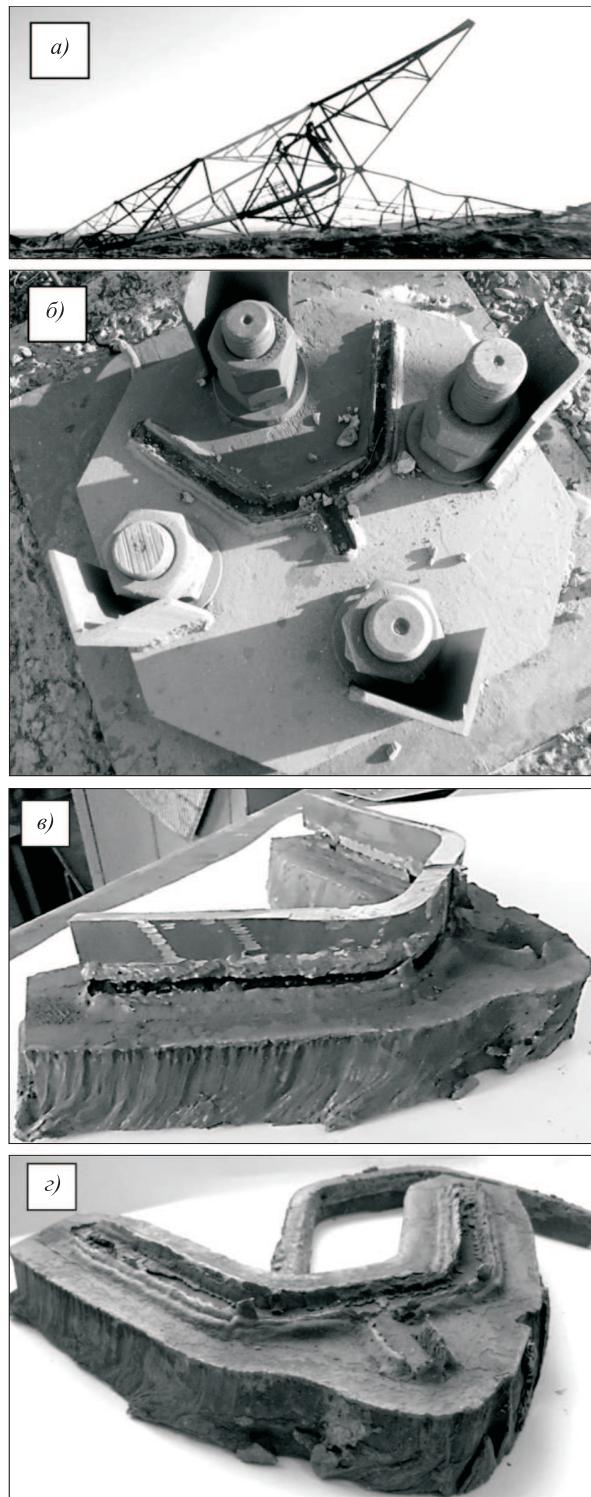
ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ ШВОВ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Анализ результатов аварии решетчатой башни сотовой связи из-за разрушения сварных угловых швов в узле соединения вертикального пояса с опорной плитой показал существование проблемы его прочности. Данный узел опоры башни относится к фланцевым соединениям. На основе компьютерного моделирования исследовано напряженно-деформированное состояние в сварных швах, соединяющих фланец со стержнем открытого сечения. Модели имитировали соединения со швами с разделкой и без разделки кромок. Исследования проводились с учетом упруго-пластической работы стали, геометрической нелинейности поведения фланцевого соединения под нагрузкой и изменения толщин фланца. Определен характер изменения напряжений в сварных швах фланцевых и тавровых соединений в зависимости от вида швов, толщины фланца и усилия натяжения болтов. Получены значения коэффициентов концентрации напряжений в сварных швах в зависимости от толщины фланцев и предварительного натяжения болтов. Опираясь на результаты численных расчетов, спрогнозирована опасность развития разрушения во фланцевом соединении со сварными швами с разделкой и без разделки кромок. Полученные результаты хорошо коррелируют с характером разрушения сварных швов в опорном узле башни.

Ключевые слова: фланцевые соединения, прочность, расчетная схема, концентрация напряжений, коэффициенты стеснения пластического деформирования, толщина фланца, предварительное натяжение болтов.

Фланцевые соединения (ФС) являются одним из наиболее эффективных монтажных соединений строительных металлических конструкций. Исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) фланцев под нагрузкой в настоящее время развиваются, и некоторые аспекты из них рассмотрены в трудах [1–7]. Изучение ФС стержней открытого профиля с упором на оценку прочности сварных швов и прогнозирование в них траектории развития разрушения продолжено в работах [8, 9]. Сварные швы являются важной составной частью ФС стержней открытого профиля. Обычно фланец к профилю стержня крепят с помощью таврового сварного соединения, которое конструктивно-технологически разделяют на два вида: без разделки кромок профиля с угловыми швами и с разделкой кромок и полным проплавлением. ФС без разделки кромок менее затратные, чем с разделкой, но их широкое применение сдерживает опасения возникновения разрушения, которое может развиться от концентратора напряжений у зазора под торцом профиля.

О существовании проблемы свидетельствуют аварии, например, обрушение в Сибири в 2013 г. решетчатой башни сотовой связи высотой 70 м с поясами из гнутого U-образного профиля 140×16 мм (рис. 1, а) и опорными плитами толщиной 60 мм. Падение произошло из-за отрыва пояса башни от



Rис. 1. Обрушение башни сотовой связи:
а – общий вид башни после обрушения; б – разрушенный по сварному шву опорный узел башни; в – общий вид фрагментов пояса и опорной плиты, взятых в месте разрушения; г – вид разрушения сварного соединения

опорной плиты под воздействием ветровой нагрузки. Согласно экспертизе в поясах башни использована сталь С345, в опорных плитах – С255 по ГОСТ 27772–88, угловые сварные швы выполнены без разделки кромок полуавтоматом в среде СО₂ проволокой Св-08Г2С. По результатам расчета усилие в поясе башни в момент обрушения соответствовало 913 кН. Причиной обрушения стала недостаточная несущая способность сварного соединения пояса башни с опорной плитой из-за некачественного углового шва, вид которого представлен на рис. 1, б–г. Согласно СП 16.13330.2017 несущую способность углового шва следует рассчитывать на срез (условный) по металлу шва и границам сплавления.

Расчеты для сварного шва опорного узла с учетом реальных катетов показали большую несущую способность по границе сплавления (1091 кН) по сравнению с несущей способностью металла шва (800 кН). Однако разрушение, вопреки расчетам, произошло по границе сплавления сварного шва с профилем пояса (см. рис. 1, в, г).

Цель работы состоит в исследовании НДС ФС с разделкой и без разделки торца присоединяемого профиля, проведенном на основе метода конечного элемента (МКЭ) в упругопластической стадии работы стали, для выявления зон прогнозируемого разрушения и оценки влияния вида сварных швов на опасность его возникновения с учетом предварительного натяжения болтов и толщины фланца.

Исследовались растянутые Т-образные модели ФС с четырьмя болтами (рис. 2, а), у которых сварной шов по своей длине имеет все характерные для фланцев участки – напротив болта и между болтами. Характеристики материала элементов ФС соответствовали сталим, использованным в конструкциях башни: продольный лист и сварной шов – сталь С345 ($\sigma_t = 330$ МПа, $\sigma_b = 480$ МПа), фланец – сталь С255 ($\sigma_t = 250$ МПа, $\sigma_b = 450$ МПа), шайба и болт – сталь 40Х «Селект» ($\sigma_t = 800$ МПа, $\sigma_b = 1100$ МПа, где σ_t и σ_b – предел текучести и временное сопротивление сталей). Продольный лист имел толщину 20 мм и два вида соединения с фланцем: без разделки кромок с угловыми швами и с разделкой кромок и полным проплавлением (рис. 2, в). Размеры всех элементов ФС назначены так, чтобы обеспечить несущую способность сварных швов, не ниже чем болтов. Сварные швы выполнены в соответствии с ГОСТ 14771–76. Диаметр болта принят 24 мм, а размеры его головки и шайбы назначены согласно ГОСТ на высокопрочные болты. Фланцы имели толщины $t = 15, 25$ и 35 мм. Расчеты осуществлялись в программном комплексе ANSYS на фрагменте (рис. 2, б, в), который с использованием принципов симметрии составлял 1/8 части модели.

В процессе создания модели растянутый элемент (продольный лист), фланец, сварные швы, шайба и болт были равномерно разбиты на объемные конечные элементы (КЭ), основная часть которых имела линейный размер 2,5 мм. При этом переход от меньшей толщины фланца к большей осуществлялся путем добавления слоев из КЭ высотой 2,5 мм. Данный подход в задании толщины позволяет учесть «масштабный фактор» – влияние толщины фланца на его НДС. У геометрических концентраторов в точках А, Б, В (рис. 2, в) линейные размеры КЭ уменьшались до 1–0,5 мм для приближения к величине постоянной материала, вводимой при расчетах коэффициентов концентрации напряжения. Постоянная материала зависит от его структуры

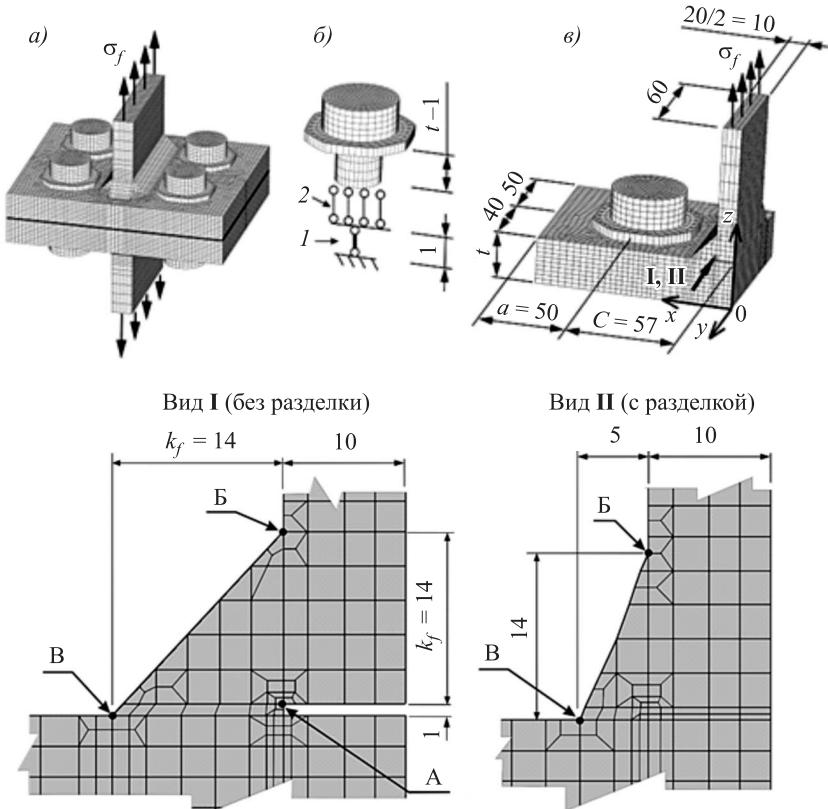


Рис. 2. Модель ФС

а – общий вид; б – элементы болта (1 – стержень диаметром 24 мм для задания предварительного натяжения, 2 – связи по оси Z между узлами стержня и объемных КЭ болта); в – фрагмент модели с основными размерами для численного анализа НДС и разбивкой МКЭ в зоне сварного шва

и прочностных свойств и для строительных сталей составляет примерно 0,5 мм [10].

Свойства материалов принимались в виде билинейных зависимостей на основе диаграмм упругопластической работы сталей. Границные условия между шайбой и фланцем, а также между фланцами задавались контактными элементами, которые обеспечивали одностороннюю связь на сжатие между смежными узлами контактирующих поверхностей фланцев и шайбы. Нагружение производилось ступенчато, что позволяло производить расчет по деформированной схеме. Первоначально в болте создавалось усилие натяжения в 240 кН. На второй ступени прикладывалось усилие растяжения к торцу продольного листа (см. рис. 2, в) в виде распределенных напряжений $\sigma_f = 50$ МПа. На последующих ступенях напряжения σ_f добавлялись равными долями по 25 МПа. Общее количество ступеней нагрузления принято равным 14 так, что на последней стадии напряжение $\sigma_f = 350$ МПа.

Дополнительно по такой же схеме нагружения были проведены расчеты ФС без предварительного натяжения болтов, а также моделей крестообразных соединений (КС) (рис. 3), подобных по геометрии моделям ФС без

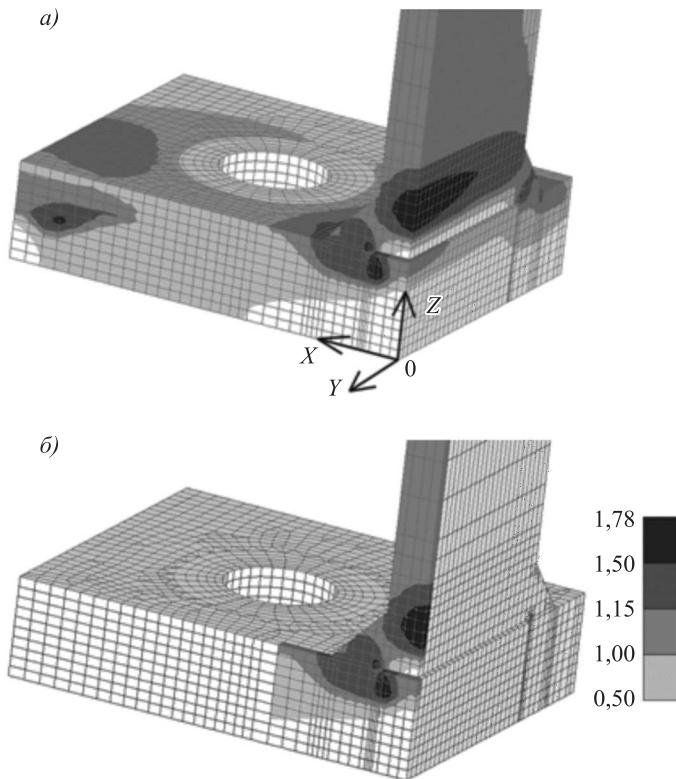


Рис. 3. Распределение коэффициента k_i в модели ФС без разделки кромок сварного шва для $t = 25$ мм при $\sigma_f = 125$ МПа (а) и в срединной плоскости $X0Z$ (б)

разделки кромок. Модели КС создавались путем замены контактных элементов под подошвой фланца на жесткие линейные связи в направлении оси Z и, тем самым, превращением фланца в поперечный лист толщиной $2t$. ФС по сравнению с КС менее жесткие, поэтому их НДС, по мере увеличения толщины фланца, будут асимптотически сходиться. Косвенно влияние жесткости ФС на НДС учитывалось отношением C/t , где C – расстояние от оси болта до продольной оси ФС (см. рис. 2, в), C/t для толщин 15, 25 и 35 мм составляет 3,80; 2,28 и 1,63 соответственно.

Для выявления опасных зон разрушения ФС использован критерий Мизеса

$$\sigma_i \leq \sigma_t, \quad (1)$$

где σ_i и σ_t – интенсивность напряжений по Мизесу и предел текучести при одноосном растяжении соответственно.

Заметим, что величина σ_i связана с максимальным главным напряжением σ_1 , а последнее с напряжениями σ_f соотношениями:

$$\sigma_i = \sigma_1/k_i; \quad \sigma_1 = k_\sigma \sigma_f, \quad (2)$$

где k_σ и k_i – коэффициенты концентрации напряжений и стеснения пластическому деформированию соответственно.

Коэффициент k_i по критерию Мизеса определяется

$$k_i = (1 - n - m + n^2 + m^2 - nm)^{-0.5}, \quad (3)$$

где $n = \sigma_2/\sigma_1$, $m = \sigma_3/\sigma_1$ – отношения главных нормальных напряжений σ_1 , σ_2 , σ_3 .

С учетом соотношения (2) условие (1) запишем в форме:

$$\sigma_f/\sigma_t \leq \alpha, \quad (4)$$

где $\alpha = k_i/k_\sigma$.

Условие (4) при $\sigma_f = \sigma_t$ примет простой вид $\alpha \geq 1$.

Расчетами установлено, что максимальные значения напряжения по Мизесу принимают в срединной плоскости $X0Z$ ФС (см. рис. 3). Поэтому для анализа коэффициентов k_σ , k_i и α был принят слой КЭ, прилегающий к этой плоскости с характерными на ней точками А, Б, В в углах и корне сварного шва.

Коэффициенты k_σ . Значения k_σ (рис. 4) в ФС зависят от величины натяжения болтов, уровня нагрузки и изгибной жесткости фланца, при этом следует ожидать существенное влияние изгибных напряжений во фланце (особенно в точке В, где они достигают максимума), показатели которых будут снижаться по мере увеличения их толщины.

Роль натяжения болтов. На первых ступенях нагружения ФС без предварительного натяжения болтов величина k_σ остается постоянной, а с натяжением изменяется по выпуклой кривой, достигая при σ_f^* локального максимума k_σ^* . Коэффициент k_σ от начала нагружения повышается до локального максимума в точке В в среднем по толщинам для ФС с разделкой на 6 % и 14 % без разделки кромок шва. В точке А аналогичное повышение составляет лишь 4 %. Величина σ_f^* практически линейно зависит

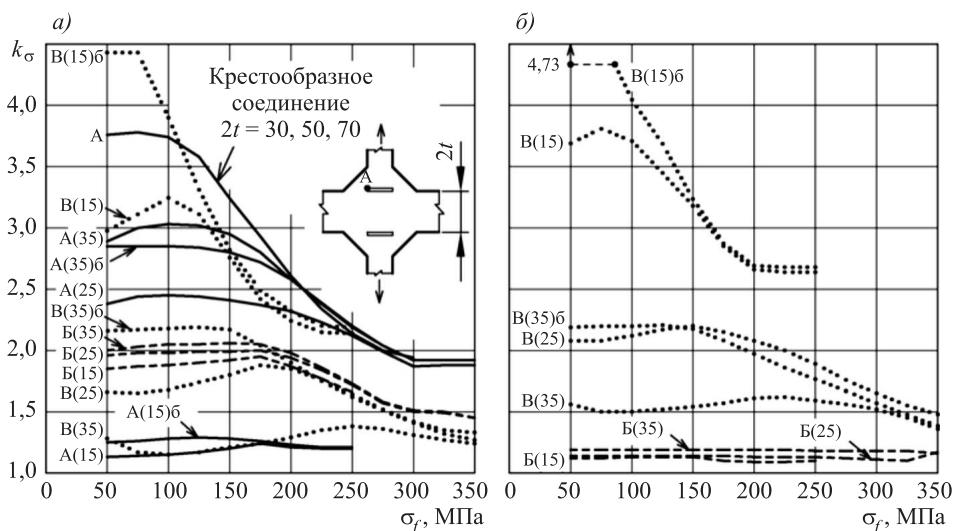


Рис. 4. Изменение коэффициентов k_σ в зависимости от нагрузки σ_f и толщины t для ФС и КС в точках А, Б, В швов без разделки (а) и с разделкой (б) кромок продольного листа (значения с индексом «б» даны для ФС без предварительного натяжения болтов)

от толщины фланца, средние отношения σ_f^*/t (точка В) с погрешностью в 5 % для ФС без разделки кромок шва составляют 0,69, а с разделкой 0,58.

Предварительное натяжение болтов снижает значение k_σ^* в месте при-мыкания сварного шва к фланцу (точка В) для швов без разделки и с раз-делкой кромок для толщин $t = 15$ мм на 36 и 24 % и $t = 35$ мм на 58 и 36 % соотвественно. В корне сварного шва (точка А) из-за предварительного натяжения болтов величина k_σ^* уменьшается на 4 % для $t = 15$ мм и растет на 6 % для $t = 35$ мм. В дальнейшем рассматриваются ФС с натяжением болтов.

Влияние жесткости ФС. Поведение k_σ^* в ФС (рис. 4, а) без разделки кромок при изменении C/t неоднозначно. Так, в корне шва k_σ^* повышается от 1,25 для $t = 15$ мм до 3,1 при $t = 35$ мм и далее при переходе к предельно жесткому фланцу, т.е. к КС до 3,75. А в угле сопряжения шва с фланцем наблюдается наоборот понижение k_σ^* с 3,25 при $t = 15$ мм до 1,38 при $t = 35$ мм и при переходе к КС до 1. В результате обработки данных, приведенных на рис. 4, а, получены зависимости изменения коэффициента k_σ^* от отношения C/t :

– в точке А

$$k_\sigma^* = 1 + 2,75 \exp(-(0,36C/t)^{2,5}), \quad (5)$$

– в точке В

$$k_\sigma^* = \exp(0,3C/t)^{1,3}. \quad (6)$$

С дальнейшим ростом нагрузки, вследствие развития «пластических деформаций», наблюдается общая тенденция к уменьшению разницы значений k_σ в одноименных точках. Коэффициент k_σ для толщин 25 и 35 мм получает наибольшие значения k_σ^* при уровнях нагрузки до $\sigma_f = 125$ МПа (см. рис. 4, а).

Фактор разделки кромок. Согласно полученным данным (см. рис. 4) разделка кромок не дает положительного эффекта для значений k_σ в угле сопряжения сварного шва с фланцем. Так, в среднем по всем толщинам значения k_σ^* в точке В для ФС с разделкой кромок шва оказываются выше чем для ФС без разделки на 17 %.

Однако, принимая во внимание, что k_σ^* в корне шва начиная с толщины 25 мм больше чем в точке В, разделка здесь оказывает свое позитивное влияние в ФС для толщин выше 25 мм.

Коэффициенты k_i . В большинстве технических расчетов прочности строительных металлоконструкций напряжения ограничиваются нижним ($\sqrt{3}/3$) σ_t (чистый сдвиг) и верхним ($2\sqrt{3}/3$) σ_t (плоская деформация) значениями, что соответствует коэффициентам k_i равным 0,58 и 1,15. В сварных угловых швах используется расчетное сопротивление стали, определенное по нижнему значению. В нашем случае все коэффициенты k_i (рис. 5) больше или равны величине 1,15. Значения k_i зависят от уровня нагрузки и толщины фланца. В корне шва величина k_i для $t = 15$ мм при увеличении нагрузки колеблется в пределах 1,15–1,30, а для толщин 25 и 35 мм эти пределы составляют 1,39–1,56 и 1,19–1,33 соответственно. В угле сопряжения сварного

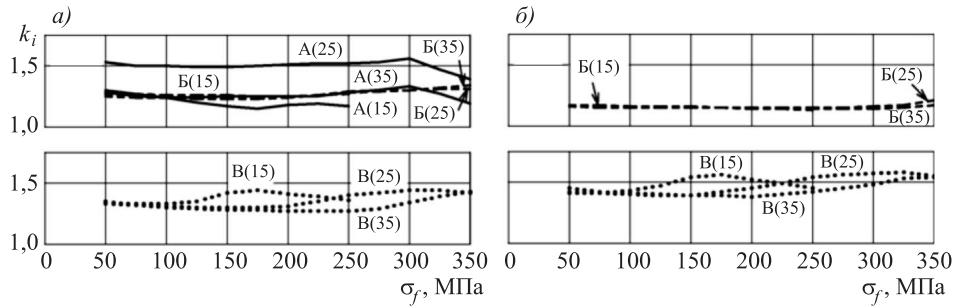


Рис. 5. Изменение коэффициентов k_i в зависимости от уровня нагрузки σ_f и толщины t в точках А, Б, В сварных швов без разделки (а) и с разделкой кромок (б) кромок продольного листа для ФС с предварительным натяжением болтов

шва с фланцем k_i мало зависят от толщины и находятся в границах 1,27–1,44 и 1,38–1,58 в ФС без разделки и с разделкой кромок соответственно.

Значение k_i практически не меняется от толщины для всех ФС в месте примыкания шва к продольному листу (точка Б).

Оценим влияние видов сварных швов на опасность возникновения разрушения для уровня нагрузки $\sigma_f = 125$ МПа (отмеченного выше при рассмотрении k_σ в точке А ФС). Для этого случая представлены изополя распределения в сечении XOZ ФС коэффициентов k_σ , k_i и α (рис. 6).

Коэффициенты α . Распределение коэффициентов α определяет места в ФС, где реализуется условие (4) для возникновения разрушения. Возможные пути разрушения показаны пунктирными линиями АБ, АВ, АС, ВЕ, ВГ и БД. Для каждой линии вычислены средние по ее длине значения коэффициентов α (белым цветом обозначены результаты при $\alpha < 1$). Минимальное значение α и его местоположение показано цифрой со стрелкой. Для толщины 15 мм применение разделки кромок не изменило место с минимальным значением α (точка В) и не привело к существенному увеличению среднего коэффициента α_{EB} , по сравнению с коэффициентом α_{AB} , чтобы он стал больше 1.

Этот результат связан с тем, что для толщины 15 мм распределение усилий ввиду малой изгибной жесткости фланца таково, что место соединения, где расположен корень шва, оказывается менее загруженным. Кроме того, разделка кромок шва ведет к снижению значений α_{VG} с 0,88 до 0,63, что свидетельствует о повышении опасности разрушения фланца по линии ВГ. Выполнение разделки кромок шва для толщин 25 и 35 мм ведет к существенному повышению средних значений по сечениям коэффициентов α до величин больше 1, что повышает несущую способность сварного соединения. Линия АС швов без разделки кромок соответствует согласно нормам СП 16.13330.2017 расчетному сечению по металлу шва, а линии АБ и АВ по границе сплавления.

В швах без разделки кромок наименьшее среднее значение коэффициента α получено при толщине 15 мм по линии АВ ($\alpha_{AB} = 0,79$), а при толщинах 25 и 35 мм по линии АБ ($\alpha_{AB} = 0,88$ и 0,80 соответственно). Для толщины 15 мм $\alpha_{AC} > \alpha_{AB}$, а для 25 и 35 мм $\alpha_{AC} \geq 1$. Согласно этим расчетам для толщин 25 и 35 мм шов имеет наименьшую прочность по линии АБ, что согласуется с видом разрушения, представленным на рис. 1.

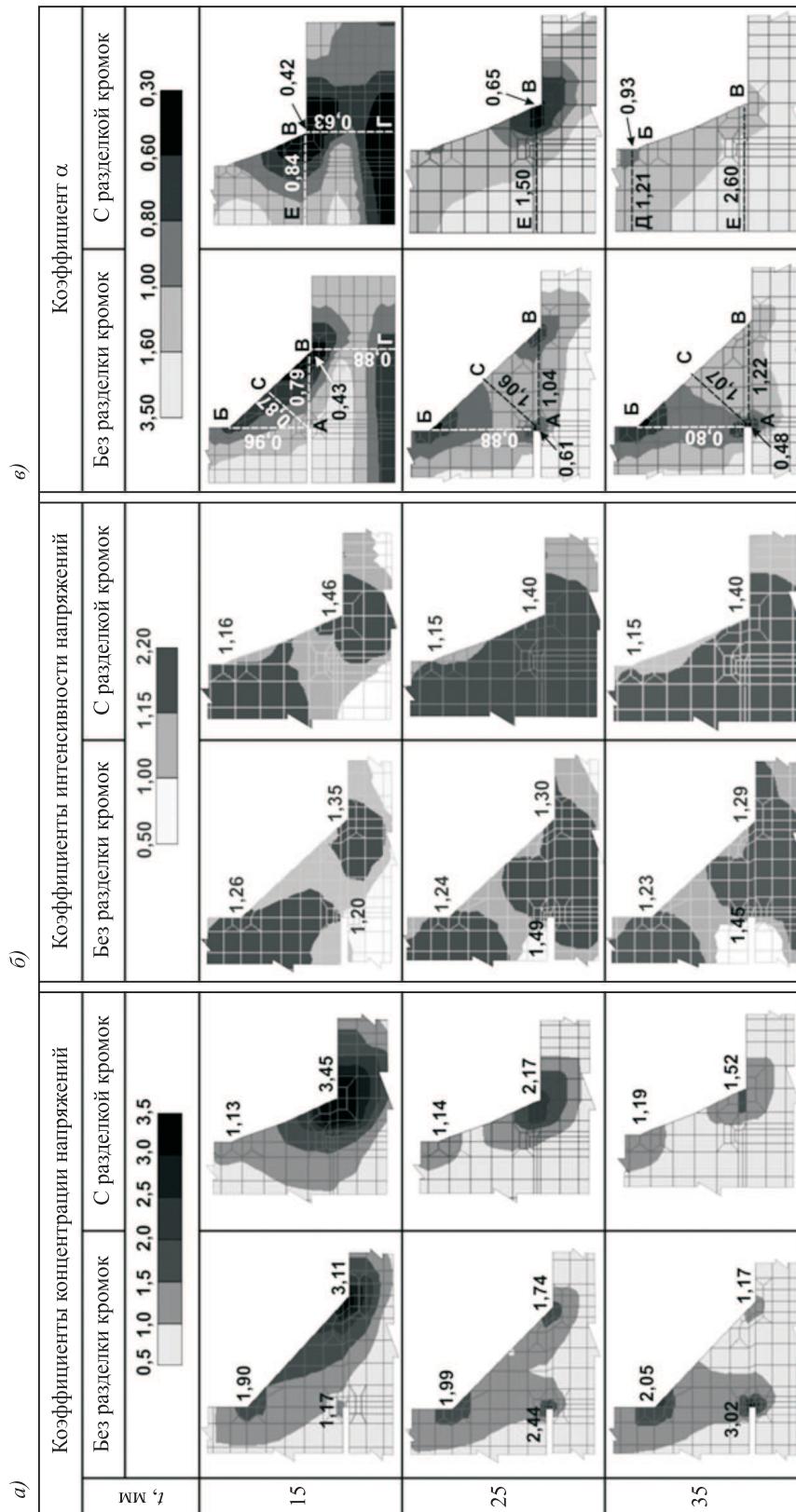


Рис. 6. Коэффициенты $k_\sigma(a)$, $k_i(\delta)$ и $\alpha(\delta)$ в сварных швах

Выводы. 1. Для ФС с угловыми сварными швами без разделки кромок коэффициенты концентрации в корне сварного шва ниже, чем для подобных им крестообразных сварных соединений. Эта разница тем меньше, чем выше жесткость фланца. Фланцевое в сопоставлении с крестообразным с точки зрения жесткости является более общим видом соединения, в котором при увеличении толщины фланца напряженно-деформированное состояние асимптотически стремится к состоянию для крестообразного соединения.

2. Концентрация напряжения в сварных швах фланцевого соединения с разделкой и без разделки кромок существенно зависит от его жесткости, косвенно определяемой отношением расстояния от оси соединения до оси болта к толщине фланца. При уменьшении этого отношения коэффициент концентрации напряжения в корне шва растет от 1,25 до 3,75 и снижается от 3,25 до 1 в угле примыкания сварного шва к фланцу, поэтому при толщинах более 25 мм ($C/t = 2,28$) требуется производить разделку кромок.

3. Для всех видов сварных швов фланцевых соединений предварительное натяжение болтов снижает концентрацию напряжений в углах сварного шва в месте его примыкания к фланцу от 24 до 58 %, а в корне углового сварного шва без разделки кромок концентрация напряжений изменяется не более чем на 6 %.

4. Наиболее опасным сечением для возникновения разрушения угловых швов без разделки кромок ФС является граница сплавления шва с продольным элементом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. М.: Машиностроение, 1990. 386 с.
2. Шахматов М.В., Айметов С.Ф., Айметов Ф.Г. Оценка несущей способности тавровых сварных соединений с непроварами в условиях вязкого разрушения при изгибе // Сварочное производство. 2008. № 4. С. 11–16.
3. Семенов А.А., Маляренко А.А., Порываев И.А., Сафиуллин М.Н. Напряженно-деформированное состояние высокопрочных болтов фланцевых соединений в укрупнительных стыках стропильных ферм // Инж.-строит. журн. 2014. № 5. С. 54–62.
4. Катюшин В.В. Здания с каркасами из стальных рам переменного сечения. М.: Стройиздат, 2005. 450 с.
5. Bahaz A., Amara S., Jaspard J.P. and Demonceau J.F. Analysis of the Behaviour of Semi Rigid Steel End Plate Connections. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201814902058> (Дата обращения: 07.07.2018).
6. Balc Roxana, Chira Alexandru, Chira Nicolae. Finite element analysis of beam to column end plate bolted connection // Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture. 2012. Vol. 55, No. 1. P. 24–29. Journal homepage: <http://constructii.utcluj.ro/ActaCivilEng>, Technical University of Cluj-Napoca, Faculty of Civil Engineering.
7. Sadeghian M.A., Yang J., Liu Q.F. Numerical Analysis of End Plate Bolted Connection with Corrugated Beam // International Science Index International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering. 2015. Vol. 9. No. 12. P. 1517–1521.

8. Шафрай К.А., Шафрай С.Д. Особенности работы фланцевых соединений архитектурно-строительных конструкций. Внекентрное растяжение болтов // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 7. С. 84–92.
9. Шафрай К.А., Шафрай С.Д. Особенности работы фланцевых соединений строительных конструкций. Контактные напряжения и рычажные силы // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 11-12. С. 89–96.
10. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.П. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.

Шафрай Константин Анатольевич, канд. техн. наук, доц.;

E-mail: konst_shafrai@mail.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Шафрай Сергей Дмитриевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: shafray.sd@yandex.ru

Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств

Получено после доработки 09.07.18

Shafray Konstantin Anatolievich, PhD, Ass. Professor; E-mail: konst_shafrai@mail.ru

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

Shafray Sergey Dmitrievich, DSc, Professor; E-mail: shafray.sd@yandex.ru

Novosibirsk State University of Architecture, Design and Art, Russia

STRENGTH OF WELDS FLANGES STEEL STRUCTURES

Analysis of the results of the accident of the ethmoid cellular tower due to the destruction of weld fillet welds in the node connection vertical belt with base plate, revealed the existence of the problem of its strength. This site supports the Tower belongs to the flanged connections. Based on computer modeling of stress-strain State is investigated in the welds connecting flange with an open section. The model simulated compounds with seams with cut and without cutting edges. The studies were conducted, taking into account the Elastoplastic work steel, geometric nonlinearity conduct flange connection under load and change the thickness of the flange. Defined the character of change of stress in the welds of carbon flange and connections, depending on the type of welds, flange thickness and effort tension bolts. Stress concentration factor values obtained in the weld seams depending on the thickness of the flange and preloading bolt. Based on the results of the numerical calculations, anticipated the risk of fracture in the flanged connection with welds with or without bevel cut. The results correlate well with the nature of the fracture of welded seams in the team site Tower.

Keywords: flanged connections, strength, design scheme, the concentration of stress, coefficients of tightness of plastic deformation, the thickness of the flange, bolt pre-tension.

REFERENCES

1. Birger I.A., Iosilevich G.B. Rez'bovye i flantsevyye soedineniya [Threaded and flanged connections]. Moscow, 1990. 386 p. (in Russian)
2. Shakhmatov M.V., Aymetov S.F., Aymetov F.G. Otsenka nesushchey sposobnosti tavrovyykh svarynykh soedineniy s neprovarami v usloviyakh vyazkogo razrusheniya pri izgibe [Evaluation of the bearing capacity of the welded joints of carbon with neprovarami in conditions of viscous bending fracture]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding]. 2008. No. 4. Pp. 11–16. (in Russian)

3. Semenov A.A., Malyarenko A.A., Poryvaev I.A., Safiullin M.N. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie vysokoprochnykh boltov flantsevykh soedineniy v ukrupnitel'nykh stykakh stropil'nykh ferm [Tensely-deformed state of high-strength bolts of flanged joints in ukrupnitelnyh joints of roof trusses]. Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal [Civil engineering magazine]. 2014. No. 5. Pp. 54–62. (in Russian)
 4. Katushin V.V. Zdaniya s karkasami iz stal'nykh ram peremennogo secheniya [Building with armatures from steel frames of variable section]. Moscow: Stroyizdat, 2005. 450 p. (in Russian)
 5. Bahaz A., Amara S., Jaspert J.P. and Demonceau J.F. Analysis of the Behaviour of Semi Rigid Steel End Plate Connections. Available at: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201814902058> (accessed 07.07.2018).
 6. Balc Roxana, Chira Alexandru, Chira Nicolae. Finite element analysis of beam to column end plate bolted connection. Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture. 2012. Vol. 55, No. 1. Pp. 24–29. Journal homepage: <http://constructii.utcluj.ro/ActaCivilEng>, Technical University of Cluj-Napoca, Faculty of Civil Engineering.
 7. Sadeghian M.A., Yang J., Liu Q.F. Numerical Analysis of End Plate Bolted Connection with Corrugated Beam. International Science Index International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering. 2015. Vol. 9. No. 12. Pp. 1517–1521.
 8. Shafrazi K.A., Shafrazi S.D. Osobennosti raboty flantsevykh soedineniy arkhitekturno-stroitel'nykh konstruktsiy. Vnetzentrennoe rastyazhenie boltov [Features the work of flanged connections architectural designs. Vnecentrennoe tensile bolts]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2013. No. 7. Pp. 84–92. (in Russian)
 9. Shafrazi K.A., Shafrazi S.D. Osobennosti raboty flantsevykh soedineniy stroitel'nykh konstruktsiy. Kontaktные напряжения и рячажные силы [Features the work of flange joints of constructions. Contact voltage and lever forces]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2013. No. 11-12. Pp. 89–96. (in Russian)
 10. Serensen S.V., Kogarev V.P., Shneyderovich R.P. Nesushchaya sposobnost' i raschet detaley mashin na prochnost' [Bearing ability and calculation machine parts for duzability]. Moscow, 1975. 488 p. (in Russian)
-

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ



УДК 691.542 : 539.4

Г.И. ОВЧАРЕНКО, Е.Е. ИБЕ, А.О. САДРАШЕВА, А.В. ВИКТОРОВ

КОНТАКТНАЯ ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОЙ ФАЗЫ C-S-H С ДОБАВКАМИ*

Изучение контактно-конденсационных свойств материалов основывается на возможности образования прочного водостойкого искусственного камня путем сближения макрочастиц, например, в процессе прессования. Данный способ получения строительных материалов весьма актуальный, поскольку позволяет в кратчайшие сроки получать прочный камень на основе отходов и побочных продуктов промышленности, например, нефелинового шлама, бетонного лома, основной фазой которых являются гидратированные минералы-силикаты – гелевидная цементная фаза C-S-H. Структурно-химический и термодинамический анализ строения наночастиц фазы C-S-H показывают, что для формирования кремнекислородных цепей на портландитовых поверхностях этих частиц выгодно сочетание кремнекислородных диортогрупп с мостишковыми алюмокислородными тетраэдрами. С этих позиций целесообразно изучение вопросов контактного твердения фазы C-S-H с различными добавками, включающими алюминаты кальция. Направленное формирование кремнеалюмокислородных цепей и модификация основности фазы C-S-H за счет применения алюминатных и силикатных добавок является научной новизной работы. В работе исследовано контактное твердение цементной фазы C-S-H с добавками портландита, нанокремнезема, наноглинозема, алюминатов кальция. Цементная фаза C-S-H синтезировалась из оксида кальция, кремнезема и воды при температуре не выше 100 °C. Экспериментальная часть содержит изучение зависимостей прочности при сжатии камня из C-S-H от вида добавок, времени твердения, давления прессования, фазового состава композиций. Показано, что добавки кремнезоля и высокоглиноземистого шлака значительно повышают прочность при сжатии прессованного камня, что обеспечивается за счет образования контактно-активных гелей C-S-H и Al(OH)_3 .

Ключевые слова: цементная фаза C-S-H, контактная прочность, добавки, портландит, кремнезоль, алюмозоль, высокоглиноземистый шлак, гидратация.

Введение. Исследованиями канадских ученых [1], а затем В.Д. Глуховского и Р.Ф. Руновой [2, 3] была установлена возможность получения водостойкого камня из предварительно гидратированного цементного камня или нефелинового шлама после прессования. В этих работах было показано, что контактно-конденсационными свойствами обладает метастабильная фаза

* Работа выполнена по гранту РФФИ 18-43-220005 р_а «Фундаментальные основы усиления вяжущих свойств цементной фазы C-S-H».

аморфных гидросиликатов кальция C-S-H – основная фаза затвердевшего цементного камня. Позже Е.М. Чернышов с сотрудниками определил [4], что достаточной водостойкостью может обладать и чисто портландитовый камень, спрессованный при 100 МПа так же, как и портландито-алюмосиликатный камень, полученный методом контактного твердения [5]. Принцип «контактного твердения» основан на способности дисперсных силикатных и алюмосиликатных веществ, находящихся в аморфном нестабильном состоянии, образовывать прочный водостойкий камень в момент сближения частиц при уплотнении [3]. Данный подход может использоваться при переработке различных отходов и побочных продуктов промышленности, например, бетонного лома прессованием [6–8], так как гидратированный цемент лома в основном состоит из фазы C-S-H и портландита. Также остается актуальной проблема устройства дорожных оснований из предварительно гидратированных материалов типа нефелинового, бокситового шламов, цементных материалов. С этих позиций становится целесообразным исследование контактного твердения цементной фазы C-S-H с добавками. Принцип выбора добавок для контактного твердения фазы C-S-H нами рассматривается исходя из особенностей кристаллохимического строения данной фазы, а также из других соображений, изложенных ниже.

Целью данной работы является исследование контактного твердения цементной фазы C-S-H с добавками.

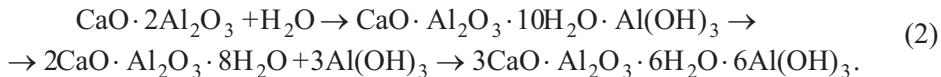
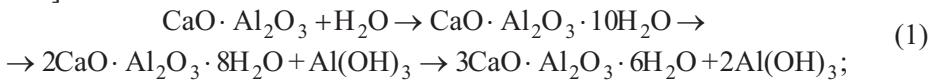
Разработка модели структуры цементной фазы C-S-H является одной из центральных научных проблем строительного материаловедения. Различные варианты моделей были предложены Т.С. Пауэрсом [9], Р.Ф. Фельдманом и П.Д. Середой [10], Х.Ф.У. Тейлором [11], группой соавторов под руководством Р. Пелленка [12]. Наибольших успехов в моделировании реальной структуры фазы C-S-H на современном этапе, вероятно, добился И.Г. Ричардсон [13]. Многие из предложенных моделей имеют крайнюю дефектность реальной структуры данной фазы. Моделирование структуры водородных связей и дефектов в расположении кремнекислородных тетраэдров, установленное С.В. Чураковым в тоберморите и ксонотлите [14], позволило трансформировать эти особенности на фазу C-S-H.

В настоящее время считается признанным выделять в строении фазы C-S-H центральный портландитовый слой, к которому с двух сторон примыкают незавершенные цепи кремнекислородных тетраэдров. Из-за несоответствия размеров основных элементов структуры (кремнекислородных тетраэдров и кальциевого октаэдра) тетраэдры вынуждены группироваться в пятичлены (два димера $[Si_2O_7]$ и один мостиковый тетраэдр, соединяющий их). Для обеспечения соразмерности в трети мостиковых тетраэдров выгоднее находиться катиону Al^{3+} вместо Si^{4+} .

Исходя из кристаллохимических особенностей структуры фазы C-S-H, в качестве добавок для ее конденсации в прочный искусственный камень целесообразно рассмотреть добавки нано- и микрокремнеземов (для завершения формирования кремнекислородных цепей), наноглинозема для формирования соизмеримого с кальциевым, кремне(алюмо)кислородного слоя.

Наноглинозем можно использовать в виде как соответствующего золя, так и продуктов гидратации алюминатов кальция.

Последний прием имеет ряд особенностей, главная из которых заключается в поэтапном формировании все более основных гидроалюминатов кальция со все большим выделением геля $\text{Al}(\text{OH})_3$. Это видно из реакций гидратации минералов глиноземистого цемента, высокоглиноземистого шлака [15–17]:



Выделяющийся гель $\text{Al}(\text{OH})_3$, помимо возможного участия в построении кремне(алюмо)кислородного слоя фазы C-S-H, является «контактно-активным», т.е. при прессовании он обеспечивает получение прочного камня. При этом, в отличие от гидратации CA, гель $\text{Al}(\text{OH})_3$ при гидратации низкоосновных алюминатом кальция CA_2 и CA_6 должен выделяться уже при образовании первичного гидрата CAH_{10} , так как иначе нарушается стехиометрия исходных алюминатов и продуктов гидратации. Кроме того, при гидратации низкоосновных алюминатов геля $\text{Al}(\text{OH})_3$ должно выделяться больше.

Использование алюминатов кальция для получения прочного камня таит в себе опасность сбросов прочности при переходе гексагональных гидроалюминатов кальция (CAH_{10} , C_2AH_8) в кубический C_3AH_6 , так как при этом объем твердой фазы уменьшается на 52 %. Такие переходы гидратов могут замедленно протекать десятилетиями при пониженных температурах или за дни, часы и минуты при повышенных температурах и щелочности системы. Поэтому запрещено смешивать портландский и глиноземистый цементы, глиноземистый цемент и известье. Однако прессование таких композиций позволяет получить камень высокой прочности [18]. Это, вероятно, объясняется устранением возникающей пористости при переходе гексагональных гидратов в кубический.

Таким образом, для усиления контактной прочности цементной фазы C-S-H целесообразно рассматривать такие добавки, как портландит, нано-кремнезем и наноглинозем.

Материалы и методы. Цементную фазу C-S-H синтезировали из оксида кальция и кремнезема (кремневая кислота безводная по ГОСТ 9428) с содержанием основных веществ не менее 97 %. Смеси указанных компонентов в различных мольных отношениях ($\text{CaO}:\text{SiO}_2 = 0,5; 1,0; 1,5$) усредняли помолом в фарфоровой шаровой мельнице, затворяли дистиллированной водой и в закрытых полиэтиленовых емкостях гидратировали при температуре 40 °C до полного перехода CaO в $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Из «гашеных» смесей при 20 МПа прессовали цилиндры высотой и диаметром около 50 мм, которые, в соответствии с диаграммой состояния $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$, пропаривали при температуре 80 °C до полного усвоения CaO для получения фазы C-S-H той или иной основности. Твердые добавки в виде портландита и алюминатов кальция в виде высокоглиноземистого шлака по ТУ 14-00186482-048-03 (таблица) усредняли в фарфоровой мельнице. Золи кремнезема и глинозема вводили путем затворения. Использовался золь кремнезема с концентрацией SiO_2 30 % с размером частиц 30–50 нм и золь глинозема концентрацией 15 % и размером частиц около 50

80 нм. Подготовленные смеси C-S-H с добавками затворялись (при необходимости) дистиллированной водой до формовочной влажности 10–12 % и прессовались при удельном давлении 20–100 МПа с получением образцов-цилиндров диаметром и высотой 50×50 или 35×35 мм. Образцы испытывались на прочность при сжатии сразу после прессования или после нормального выдерживания при 1–28 сут. По полученным результатам строились соответствующие статистические математические модели.

Результаты и их обсуждение. Ранее нами было показано [19], что прочность прессованного камня из синтезированной описанным выше методом фазы C-S-H возрастает с ростом удельного давления прессования, временем нормального выдерживания прессовок, увеличением дозировки в смеси с ней портландита и мало зависит от основности этой фазы. Максимальные значения прочности достигаются в суточном возрасте 10 МПа, в 28-суточном – 20–23 МПа.

Добавление к смеси фаз C-S-H и 15 % портландита кремнезоля в количестве 4 % (по твердому) повышает суточную прочность прессованного камня в 1,5 раза до 15 МПа, а 28-суточную в 1,2–1,4 раза до 28 МПа (рис. 1).

$$\text{Model: } R = C/S \cdot a + P \cdot b + 2 \cdot C/S \cdot P \cdot a \cdot b \\ z = x^*(-0,119173) + y^*(0,175547) + 2 \cdot x \cdot y^*(-0,119173) \cdot (0,175547)$$

Предел прочности при сжатии R , МПа

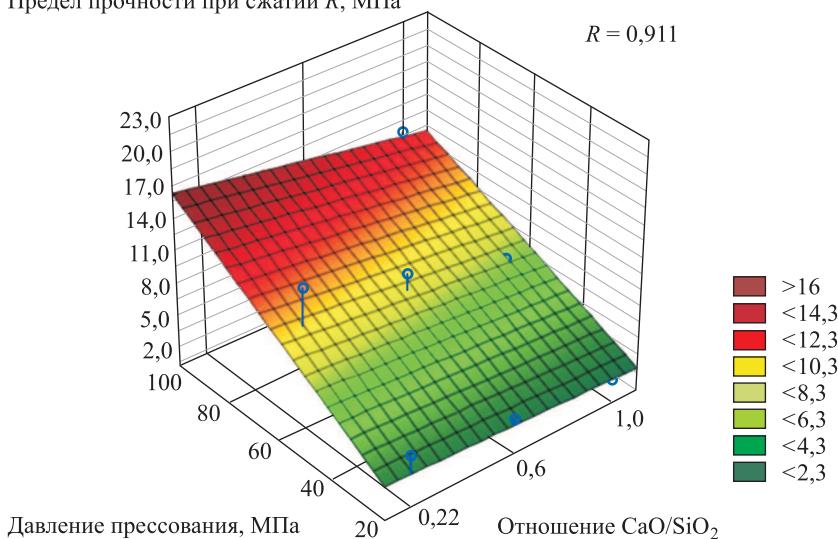


Рис. 1. Зависимость прочности при сжатии камня из C-S-H с добавлением 4 % (по твердому) кремнезоля от соотношения CaO/SiO_2 в геле и давления прессования после суток нормального твердения

Химический состав	Марка	
	КВЦ = 75	КВЦ = 70
AL ₂ O ₃ не менее класс А	75,0	70,0
класс Б	73,0	68,0
CaO не менее класс А	17,6	19,5
класс Б	19,0	22,0
Cr ₂ O ₃ в пределах	0,2–2,5	0,2–2,5
SiO ₂ + FeO не более	1,5	2,0
MgO не более	3,0	4,0
C не более	0,15	0,15

$$R = (-3,64) * C/S^2 + (0,01) * VGS^2 + (0,21) * C/S * VGS + (23,80)$$

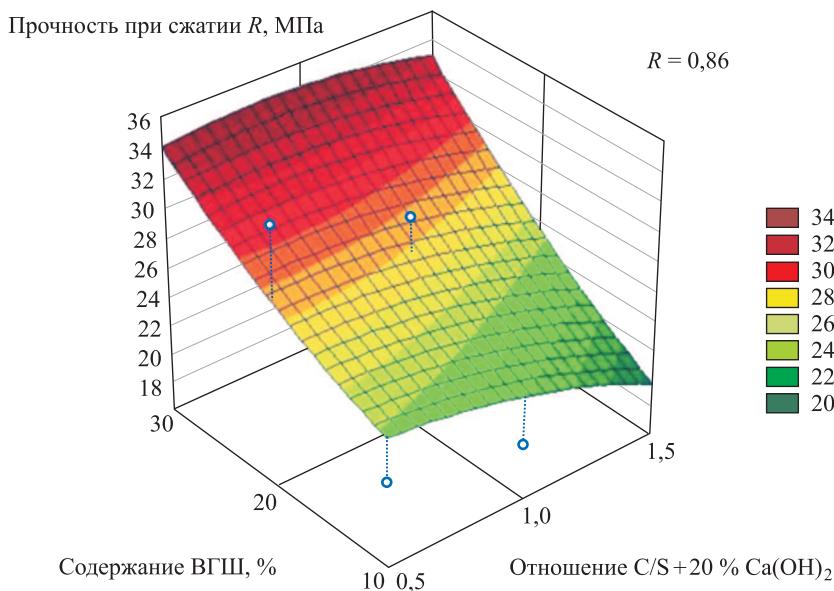


Рис. 2. Зависимость прочности при сжатии прессованного камня из C-S-H + 15 % портландита от содержания ВГШ и от соотношения CaO/SiO_2 в геле при давлении прессования 80 МПа после 28 сут нормального твердения

Добавление алюмозоля в указанную смесь гидратных фаз не показало увеличение прочности. В то же время добавка высокоглиноземистого шлака (ВГШ) повышает прочность прессованного камня до 34 МПа (рис. 2). При этом наблюдается квадратическая (экспоненциальная) зависимость роста прочности с дозировкой ВГШ. Также отмечается саморазогрев прессовок до высоких температур (рис. 3), что должно приводить к повышенной скорости гидратации и быстрой перестройке гидроалюминатов в сторону кубического.

Исследования процессов гидратации алюминатов кальция чаще всего сводятся к рассмотрению кинетики взаимодействия чистых высокоосновных соединений или моноалюмината кальция с водой с переходом от многоводных алюминатов типа C_4AH_{10} до кубического гидроалюмината кальция

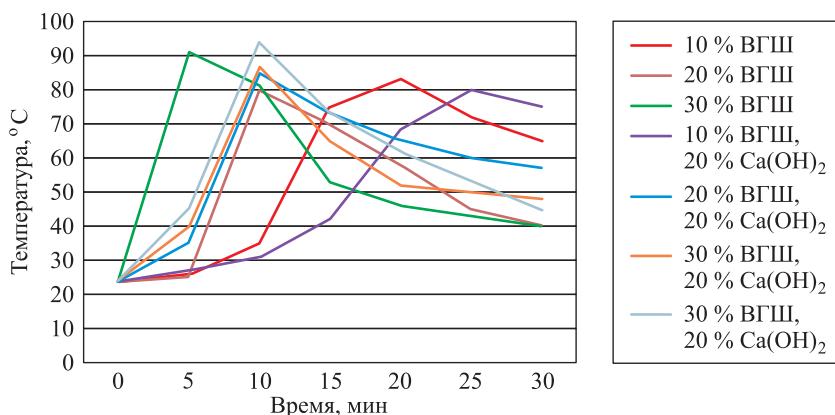


Рис. 3. Развитие температуры в образцах из C-S-H с добавками после прессования при 80 МПа

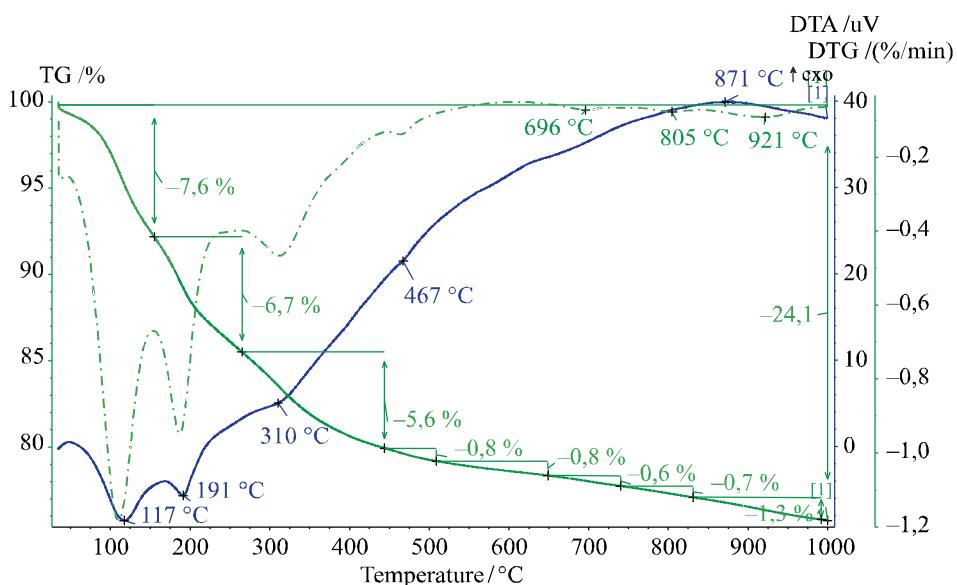


Рис. 4. Термограмма гидратированной в течение 28 сут смеси ПЦ + 20 % ВГШ [20]

C_3AH_6 с характерным сбросом прочности. Повышение прочности при сжатии прессованного камня из $\text{C-S-H} + 15\%$ портландита с добавкой ВГШ объясняется тем, что высокоглиноземистый шлак полностью состоит из алюминатов кальция (причем на 60 % из двуалюмината кальция) и в процессе прессования происходит быстрое перестроение гидроалюминатов по реакциям (1) и (2) с образованием повышенного количества геля Al(OH)_3 .

Поскольку гидратация алюминатов кальция сопровождается выделением геля глинозема Al(OH)_3 , можно предположить, что повышение прочности также связано с его образованием, так как гель глинозема является высокодисперсной системой с развитой поверхностью и может значительно увеличить контактную прочность камня. Предложенный механизм упрочнения камня из C-S-H и портландита с добавкой ВГШ подтверждают данные термического анализа гидратированной композиции «портландцемент + ВГШ» (рис. 4).

Из данных термического анализа видно, что камень в повышенном количестве содержит гексагональные гидраты (эндоэффект при 191 °C) и кубический C_3AH_6 в смеси с Al(OH)_3 – эндоэффект при 310 °C. Возможно данный эффект относится только к Al(OH)_3 , так как эндоэффекты для Al(OH)_3 и C_3AH_6 совпадают.

Таким образом, данное исследование показывает, что значительное повышение контактной прочности цементной фазы C-S-H возможно за счет применения как добавок кремнезоля, так и высокоглиноземистого шлака, содержащего низкоосновные алюминаты кальция (CA_2 , CA_6), в процессе гидратации которого в повышенных количествах образуется гель Al(OH)_3 , обеспечивающий увеличение контактной прочности композиции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Soroka I., Sereda P.J. The structure of cement-stone // Proceedings of the Fifth International Symposium of the Chemistry of Cement. Tokio, 1968. P. 3. Vol. 3. P. 67–73.

2. Глуховский В.Д., Рунова Р.Ф. Свойства дисперсных продуктов гидратации цемента // Шестой Международный конгресс по химии цемента. М.: Стройиздат, 1976. Т. 2, кн. 1. С. 90–94.
3. Глуховский В.Д., Рунова Р.Ф., Максунов С.Е. Вяжущие и композиционные материалы контактного твердения. Киев: Вища школа, 1991. 243 с.
4. Чернышов Е.М., Потамошнева Н.Д. Искусственный камень на основе кристаллизации портландита // Современные проблемы строительного материаловедения: Академические чтения РААСН: Материалы Междунар. конф. Самара, 1995. С. 20–21.
5. Степанова М.П. Наноструктурные портландито-алиомосиликатные контактно-конденсационные системы твердения и композиты на их основе // Вестн. МГСУ. 2013. № 2. С. 114–122.
6. Рамачандран В., Фельдман Р., Бодуэн Дж. Наука о бетоне. Физико-химическое бетоноведение. М.: Стройиздат, 1986. 278 с.
7. Овчаренко Г.И., Назаров Д.М., Викторов А.В. Переработка растворимой части бетонного лома // Эффективные рецептуры и технологии в строительном материаловедении: Сб. Междунар. науч.-техн. конф. / Новосиб. гос. аграр. ун-т. Новосибирск, 2017. С. 224–227.
8. Овчаренко Г.И., Викторов А.В., Дорофеев А.А., Пупынин М.Г. Материалы и конструкции контактного твердения из бетонного лома (часть 1) // Ползунов. альм. 2017. № 2. С. 201–203.
9. Powers T.C., Brownards T.L. Studies of physical properties of hardened Portland cement paste // Research Laboratories of the Portland Cement Association. Chicago, March, 1948. Bull. 22.
10. Feldman R.F., Sereda P.J. A new model for hydrated Portland cement and its practical implications // Engineering Journal (Canada). 1970. Vol. 53, No. 8/9. P. 53–59.10.
11. Тейлор Х. Химия цемента / Пер. с англ. М.: Мир, 1996. 560 с.
12. Pellenq R.J.-M., Kushima A., Shahsavari R., Van Vliet K.J., Buehler M.J., Yip S., Uilm F.-J. A realistic molecular model of cement hydrates // PNAS. 2009. Vol. 106, No. 38. P. 16102–16107.
13. Richardson I.G. The calcium silicate hydrates // Cem Conc Res. 2008. No. 38. P. 137–158.
14. Churakov S.V., Mandaliev P. Structure of the hydrogen bonds and silica defects in the tetrahedral double chain of xonotlite // Cem Conc Res. 2008. No. 38. P. 300–311.
15. Кузнецова Т.В., Кудряшова И.В., Тимашев В.В. Физическая химия вяжущих материалов. М.: Высш. шк., 1989. 384 с.
16. Румянцев П.Ф., Хотимченко В.С., Никущенко В.М. Гидратация алюминатов кальция. Л.: Наука, 1974. 80 с.
17. Кузнецова Т.В. Алюминатные и сульфоалюминатные цементы. М.: Стройиздат, 1986. 208 с.
18. Пащенко А.А., Чистяков В.В., Мясникова Е.А., Абакумова Л.Д. Гидратация и твердение в системе «глиноземистый цемент – портландцемент» при прессовании // Цемент. 1990. № 9. С. 16–18.
19. Овчаренко Г.И., Садрашева А.О., Викторов А.В. Контактно-конденсационные свойства гидратных фаз цементного камня // Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин). 2017. Т. 20, № 2. С. 141–149.
20. Ибе Е.Е. Гидротехнический бетон на композиционном портландцементе с минеральными добавками, содержащими высокоглиноземистые шлаки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2016.

Овчаренко Геннадий Иванович, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: egogo1980@mail.ru

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Ибе Екатерина Евгеньевна, канд. техн. наук; E-mail: Katerina.ibe@mail.ru

Сибирский федеральный университет, г. Абакан

Садрашева Айжана Олеговна, асп.; E-mail: ooogost91@list.ru

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Викторов Артем Владимирович, ассист.; E-mail: artem.viktorov2011@yandex.ru

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Получено 24.07.18

Ovcharenko Gennadiy Ivanovich, DSc, Professor; E-mail: egogo1980@mail.ru

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Ibe Ekaterina Evgen'evna, PhD; E-mail: Katerina.ibe@mail.ru

Siberian Federal University, Abakan, Russia

Sadrasheva Ajzhana Olegovna, Post-graduate Student;

E-mail: ooogost91@list.ru

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Viktorov Artem Vladimirovich, Assistant;

E-mail: artem.viktorov2011@yandex.ru

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

CONTACT STRENGTH OF C-S-H CEMENT PHASE WITH ADDITIVES

The study of the contact-condensation properties of building materials is based on the possibility of forming a durable water-resistant artificial stone by convergence of particulates, for example, in the pressing process. It allows to obtain in the shortest time possible a durable material based on waste and by-products of the industry, for example, nepheline sludge, concrete scrap, the main phase of which are hydrated silicate minerals – C-S-H cement phase. Structural-chemical and thermodynamic analyzes of the structure of C-S-H phase nanoparticles show that for the formation of silicon-oxygen chains on the portlandite surfaces of these particles, a combination of silicon-oxygen diortho groups with bridging alumina-oxygen tetrahedra is advantageous. That's why it is advisable to study the contact hardening of the C-S-H phase with various additives including calcium aluminates. The directional formation of silica-alumino-copper chains and the modification of the basicity of the C-S-H phase due to the use of aluminate and silicate additives is a scientific novelty of the work. The contact hardening of the C-S-H cement phase with additions of portlandite, nano-silica, nano-alumina was carried out in this work. The C-S-H cement phase was synthesized from calcium oxide, silica and water at a temperature of no higher than 100 °C. The experimental part contains a study of the dependences of the compressive strength of a stone from C-S-H on the type of additives, hardening time and pressing pressure. It is shown that the addition of high-alumina slag significantly increases the compressive strength of the pressed stone, which is provided by the formation of contact-active C-S-H and gel Al(OH)₃.

К e y w o r d s: C-S-H cement phase, contact strength, additives, portlandite, silica powder, alumina powder, high-aluminate slag, hydration.

REFERENCES

1. Soroka I., Sereda P.J. The structure of cement-stone. Proceedings of the Fifth International Symposium of the Chemistry of Cement. Tokio, 1968. P. 3. Vol. 3. Pp. 67–73.

2. Glukhovskiy V.D., Runova R.F. Svoystva dispersnykh produktov gidratatsii tsementa [Properties of dispersed products of cement hydration]. Shestoy Mezhdunarodnyy kongress po khimii tsementa [Sixth International congress on chemistry of cement]. Moscow, Stroyizdat, 1976. T. 2, Pr. 1. Pp. 90–94. (in Russian)
3. Glukhovskiy V.D., Runova R.F., Maksunov S.E. Vyazhushchchie i kompozitsionnye materialy kontaktnogo tverdeniya [Knitting and contact hardening composite materials]. Kiev, 1991. 243 p. (in Russian)
4. Chernyshov E.M., Potamoshneva N.D. Iskusstvennyy kamen' na osnove kristallizatsii portlandita [Artificial stone based on the crystallization of Portlandite]. Sovremennye problemy stroitel'nogo materialovedeniya: Akademicheskie chteniya RAASN: Materialy Mezhdunar. konferentsii [Modern problems of building materials science: Academic readings of the RAACS: materials of the Intern. conferences]. Samara, 1995. Pp. 20–21. (in Russian)
5. Stepanova M.P. Nanostrukturye portlandito-alyumosilikatnye kontaktno-kondensatsionnye sistemy tverdeniya i kompozity na ikh osnove [Nanostructured portlandite-aluminosilicate contact-condensation curing systems and composites based on them]. Vestnik MGSU [Bull. MSSU]. 2013. No. 2. Pp. 114–122. (in Russian)
6. Ramachandran V., Feldman R., Boduehn Dzh. Nauka o betone. Fiziko-khimicheskoe betonovedenie [Science of Concrete. Physical and Chemical Concrete Science]. Moscow, Stroyizdat, 1986. 278 p. (in Russian)
7. Ovcharenko G.I., Nazarov D.M., Viktorov A.V. Pererabotka rastvornoy chasti betonnogo loma [Processing of the mortar part of concrete scrap]. Effektivnye retsepty i tekhnologii v stroitel'nom materialovedenii: Sbornik Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii / Novosibirskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet [Effective formulations and technologies in building materials, a collection of the International Scientific and Technical Conference]. Novosibirsk, 2017. Pp. 224–227. (in Russian)
8. Ovcharenko G.I., Viktorov A.V., Dorofeev A.A., Pupynin M.G. Materialy i konstruktsii kontaktnogo tverdeniya iz betonnogo loma (chast' 1) [Materials and structures of contact hardening from concrete scrap (part 1)]. Polzunovskiy al'manakh [Polzunovsky Almanac]. 2017. No. 2. Pp. 201–203. (in Russian)
9. Powers T.C., Brownyards T.L. Studies of physical properties of hardened Portland cement paste. Research Laboratories of the Portland Cement Association. Chicago, March, 1948. Bull. 22.
10. Feldman R.F., Sereda P.J. A new model for hydrated Portland cement and its practical implications. Engineering Journal (Canada). 1970. Vol. 53. No. 8/9. Pp. 53–59.10.
11. Tejlor H. Khimiya tsementa [Cement Chemistry]. Moscow, 1996. 560 p. (in Russian)
12. Pellenq R.J.-M., Kushima A., Shahsavar R., Van Vliet K.J., Buehler M.J., Yip S., Ulm F.-J. A realistic molecular model of cement hydrates. PNAS. 2009. Vol. 106, No. 38. Pp. 16102–16107.
13. Richardson I.G. The calcium silicate hydrates. Cem Conc Res. 2008. No. 38. Pp. 137–158.
14. Churakov S.V., Mandaliyev P. Structure of the hydrogen bonds and silica defects in the tetrahedral double chain of xonotlite. Cem Conc Res. 2008. No. 38. Pp. 300–311.
15. Kuznetsova T.V., Kudryashova I.V., Timashev V.V. Fizicheskaya khimiya vyazhushchikh materialov [Physical chemistry of binders]. Moscow, 1989. 384 p. (in Russian)
16. Rumyantsev P.F., Khotimchenko V.S., Nikushchenko V.M. Gidratatsiya alyuminatov kal'tsiya [Calcium aluminates hydration]. Leningrad, 1974. 80 p. (in Russian)

17. Kuznetsova T.V. Alyuminatnye i sul'foalyuminatnye tsementy [Aluminate and sulfoaluminate cements]. Moscow, 1986. 208 p. (in Russian)
 18. Pashchenko A.A., Chistyakov V.V., Mysnikova E.A., Abakumova L.D. Gidratatsiya i tverdenie v sisteme «glinozemistyy tsement – portlandtsement» pri pressovanii [Hydration and hardening in the system "aluminous cement – portland cement" during pressing]. Tsement [Cement]. 1990. No. 9. Pp. 16–18. (in Russian)
 19. Ovcharenko G.I., Sadrashova A.O., Viktorov A.V. Kontaktno-kondensatsionnye svoystva hidratnykh faz tsementnogo kamnya [Contact-condensation properties of hydrated phases of cement stone]. Trudy Novosibirskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta (Sibstrin) [Proceedings of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)]. 2017. T. 20, No. 2. Pp. 141–149. (in Russian)
 20. Ibe E.E. Gidrotehnicheskiy beton na kompozitsionnom portlandtemente s mineral'nymi dobavkami, soderzhashchimi vysokoglinozemistye shlaki: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Hydrotechnic concrete on composite Portland cement with mineral additives containing high-alumina slags: Extended abstract of candidate's thesis]. Tomsk, 2016. (in Russian)
-

УДК 691.327 : 666.973.6

Н.А. МАШКИН, А.И. КУДЯКОВ, Е.А. БАРТЕНЬЕВА

НЕАВТОКЛАВНЫЙ ПЕНОБЕТОН, ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫЙ МИНЕРАЛЬНЫМИ И ВОЛОКНИСТЫМИ ДОБАВКАМИ

Установлено, что при введении дисперсных волластонитовых и диопсидовых добавок, а также стеклянных и базальтовых волокон повышается агрегативная устойчивость пенобетонной смеси, снижаются средняя плотность и коэффициент теплопроводности неавтоклавного пенобетона, возрастает стойкость пористой структуры. Получены теплоизоляционные пенобетоны с дисперсными волластонитовыми и диопсидовыми добавками со средней плотностью 274–375 кг/м³, коэффициентом теплопроводности 0,07 Вт/(м · °C) и усадкой при высыхании 1,7–2,0 мм/м, а также с базальтовыми и стеклянными волокнами соответственно 394–449 кг/м³, 0,07–0,09 Вт/(м · °C) и 2,8–3,1 мм/м с более однородными параметрами качества пенобетона. Пенобетон с добавками экономически целесообразно использовать для устройства ограждающих конструкций зданий.

Ключевые слова: неавтоклавный пенобетон, пенообразователь, минеральные дисперсные добавки, волокнистые добавки, стабильность ячеистой структуры, прочность, средняя плотность, теплопроводность.

Одной из важнейших проблем современного строительства является ресурсо- и энергосбережение при возведении зданий и их эксплуатации. Существенное влияние на решение данной проблемы оказывают термическое сопротивление и масса ограждающих конструкций зданий. Для условий Сибири в качестве эффективных стеновых материалов рекомендуется теплоизоляционный пенобетон, обладающий технологичностью, удовлетворительной средней плотностью и теплопроводностью, а также низкой стоимостью. Пенобетонная смесь может использоваться как для изготовления изделий (заводская технология), так и при устройстве ограждающих конструкций на строительной площадке [1–4].

При изготовлении стеновых материалов из теплоизоляционного пенобетона необходимо управлять процессами образования и сохранения пор для уменьшения усадочных деформаций, что приводит к снижению средней плотности и теплопроводности, улучшению однородности показателей качества. При исследовании технологических процессов необходимо использовать методологию системного подхода на всех этапах жизненного цикла теплоизоляционного бетона, начиная от выбора пенообразователей и модифицирующих добавок, создания устойчивой пены и заканчивая условиями твердения и эксплуатации [2]. Повышение однородности параметров качества пенобетона может быть обеспечено при условии создания стабильной пористой структуры [5–7].

Стойкость пенной структуры зависит от прочности адсорбционного слоя воздушных пузырьков, которая может быть повышена путем увеличения вязкости жидкости при введении добавок-стабилизаторов (гидрофильных добавок-загустителей) [7–9]. Молекулы этих веществ, встраиваясь между адсорбированными молекулами пенообразователя, связывают их в прочные комплексы. При введении в пеноконцентрат материалов, способных образовывать коллоидные растворы, значительно повышается структурная вязкость пленочной жидкости. В качестве таких веществ можно использовать мыла, канифоль, желатин, клей, крахмал, жидкое стекло, глицерин, силика-гель, поликариламид, поливиниловый спирт, продукты производства целлюлозы [5, 8–10]. При этом увеличивается вязкость раствора и пленок, замедляется процесс истечения жидкости из пен, что обеспечивает стойкость пенной структуры.

Для повышения устойчивости пен в пенобетоне рекомендуется также использовать стабилизаторы в виде высокодисперсных минеральных компонентов, которые адсорбируются на поверхности ячеек пены и препятствуют стеканию жидкости на границу Плато [9]. Для повышения стабильности структуры и уменьшения усадочных деформаций в производстве теплоизоляционных пенобетонов эффективны армирующие добавки [10–14], которые обеспечивают повышенную связность и формоустойчивость фибропенобетонных смесей при перемешивании, укладке и формировании изделий и конструкций.

Цель работы: разработка научно обоснованных составов цементно-зольного теплоизоляционного пенобетона естественного твердения с минеральными дисперсными и волокнистыми добавками и технологических приемов его изготовления.

Объектами исследования являются цементно-зольная пенобетонная смесь и пенобетон естественного твердения. Предмет исследования – управление технологическими процессами изготовления пенобетона, модифицированного минеральными дисперсными и волокнистыми добавками.

При проведении исследований применяли следующие материалы:

– портландцемент ПЦ 500 Д0 (Искитимский цементный завод), химический состав, мас. %: CaO – 63,63; SiO₂ – 20,46; Al₂O₃ – 4,29; Na₂O₃ – 0,41; K₂O – 0,97; MgO – 1,94; TiO₂ – 0,23; Fe₂O₃ – 3,69; SO₃ – 1,77, истинная плотность – 3060 кг/м³, насыпная плотность – 1083 кг/м³, фактическая активность – 49,4 МПа (ГОСТ 10178–85);

– зола-уноса (ТЭЦ-5, г. Новосибирск), химический состав, мас. %: SiO₂ – 60,77; Al₂O₃ – 19,45; Fe₂O₃ – 5,16; CaO – 5,12; MgO – 2,10; Na₂O – 0,89; K₂O – 2,01; SO₃ – 0,54; BaO – 0,20, насыпная плотность – 885 кг/м³, истинная плотность – 1870 кг/м³, остаток на сите 008 (по массе) 4,49 % (ГОСТ 25818–91);

– волластонит (Алтайское месторождение), химический состав, мас. %: SiO₂ – 46,1; Al₂O₃ – 2,93; Fe₂O₃ – 4,44; CaO – 45,12; MgO – 0,9, истинная плотность 2455 кг/м³, удельная поверхность – 90 м²/кг;

– диопсид (Слюдянское месторождение), химический состав, мас. %: CaO – 25,03; MgO – 20,01; SiO₂ – 51,33; Al₂O₃ – 1,88; Fe₂O₃ – 0,84; MgO – 20,01; K₂O – 0,17, истинная плотность – 2778 кг/м³, удельная поверхность –

100 м²/кг (волластонит и диопсид измельчали в центробежной дисковой мельнице непрерывного действия «Аго-9» до удельной поверхности 300 и 600 м²/кг и вводили в пену или растворную смесь);

– стеклянное рубленое волокно марки ЕС 13-12-4С (Армпласт) с длиной волокон 12,3 мм и диаметром 13,7 мкм, химический состав, мас. %: SiO₂ – 60,7; Al₂O₃ – 0,1; ZrO₂ – 20,0; Fe₂O – 2,6; Na₂O – 14,1; K₂O – 2,4;

– базальтовая фибра с длиной волокон 12 мм, диаметром 12 мкм, химический состав, мас. %: SiO₂ – 50,5; Al₂O₃ – 18,0; CaO – 8,5; Fe₂O₃ – 12,0; MgO – 4,5; Na₂O – 3,5; K₂O – 3,0.

Коэффициент вариации при определении химического состава компонентов не превышал 4,4 %. Химический состав волокон указан по данным паспорта на продукцию, схожие составы встречаются и в других источниках [15–17]. Для приготовления пены использовали протеиновый пенообразователь Неопор и синтетический ПБ-2000. Неопор состоит из протеинов (белков) – биополимеров (DIN 14272), а ПБ-2000 – это водный раствор солей алкилсульфатов первичных жирных спиртов фракции С8–С15 со стабилизирующими добавками (ТУ 2481-185-05744685-01).

Пенобетонную смесь готовили по двухстадийной технологии [18]. Отформованные образцы выдерживали в нормальных условиях в течение 28 сут, после чего проводили испытания. На рынке строительных материалов наиболее распространены пенобетоны с плотностью 600–800 кг/м³, так как в промышленных условиях достаточно трудно получить теплоизоляционный пенобетон. Для сравнения результатов исследования был подобран бездобавочный состав, рассчитанный на марку по плотности D500. По результатам испытаний его плотность составила 547 кг/м³. Для повышения устойчивости пенобетонной смеси и снижения средней плотности в материал вводили волокнистые и дисперсные минеральные добавки.

Вид и свойства пенообразующей добавки, особенности формирования порового пространства оказывают значительное влияние на свойства строительной пены и эксплуатационные характеристики пенобетона. Исследованиями установлено, что в пенобетонах с белковым пенообразователем Неопор формируются «влажные» пены с плотностью 90–212 кг/м³ (рис. 1, а). Пена на основе пенообразователя Неопор меньше разрушается при перемешивании с цементно-песчаной составляющей пенобетонной смеси по сравнению с пеной из ПБ-2000, а в пенобетоне формируются преимущественно замкнутые поры, равномерно распределенные по объему (рис. 1, в). Структура пенобетона на синтетическом пенообразователе ПБ-2000 состоит из более крупных пор неправильной формы, частично сообщающихся (рис. 1, г). В дальнейших исследованиях пенобетона использовали более эффективный белковый пенообразователь.

Для определения оптимального времени приготовления пенобетонной смеси и скорости вращения рабочего органа пеногенератора на характеристики пенобетона проводили исследования с помощью метода математического планирования эксперимента [19]. Был проведен двухфакторный эксперимент на трех уровнях. По результатам предварительных исследований установлены нижние и верхние уровни для рассматриваемых

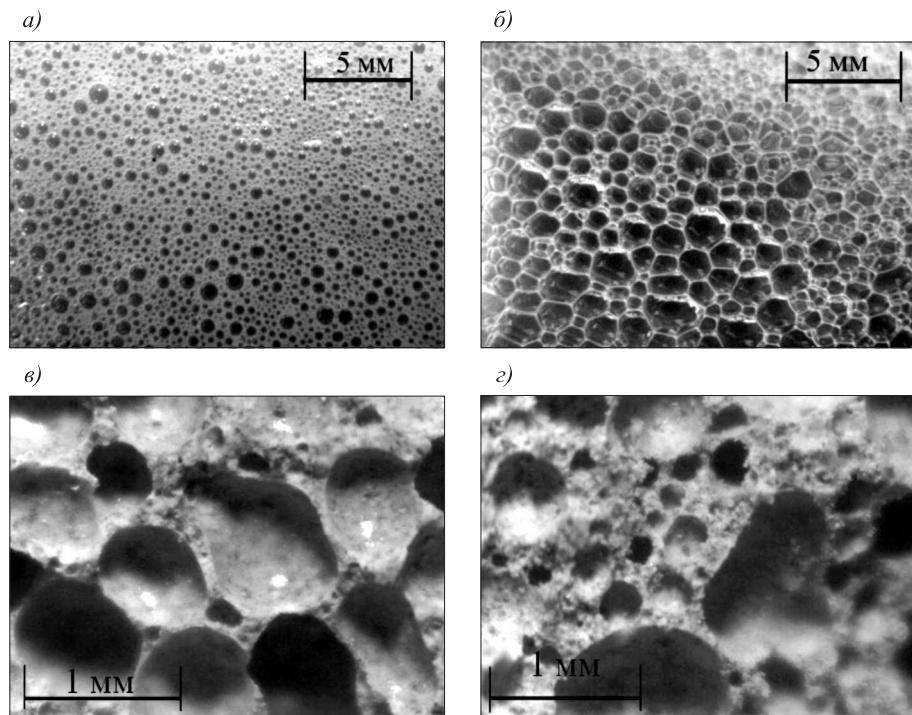


Рис. 1. Пена, полученная на пенообразователе белковом (а), синтетическом (б) (увеличение $\times 5$), Неопор (в), ПБ-2000 (г) (увеличение $\times 60$)

факторов: средней плотности, коэффициента теплопроводности, предела прочности при сжатии и при изгибе. Оптимальное количество оборотов в минуту пеногенератора 10 640 и время приготовления пены 10 мин.

При введении в пенобетонную смесь волластонитовых и диопсидовых дисперсных добавок, стеклянных и базальтовых волокон повышаются стойкость пены в растворной смеси и агрегативная устойчивость пенобетонной смеси на 26–30, 30–54, 23 и 22 % соответственно. Показатели стойкости пены в растворной смеси при введении базальтовых и стеклянных волокон (0,90; 0,91) ниже, чем при введении минеральных дисперсных диопсидовых и волластонитовых добавок (0,96; 1,14). Коэффициент стойкости пены в растворной смеси без добавок 0,74. Таким образом, введение указанных добавок в растворную смесь позволяет улучшить стабильность пенной структуры пенобетона и получить больший объем воздухововлечения.

Влияние дисперсных волокон на свойства пенобетона приведены на рис. 2, а минеральных дисперсных добавок – в табл. 1.

Вследствие повышения агрегативной устойчивости пенобетонной смеси с волокнистыми добавками снижается средняя плотность пенобетона с базальтовой фиброй до 387, а со стеклянной – до 394 кг/м³. При этом уменьшается и теплопроводность материала. Коэффициент теплопроводности пенобетона с базальтовыми волокнами равен 0,073 Вт/(м · °C), со стеклянными – 0,097 Вт/(м · °C). Оптимальное количество базальтовых и стеклянных волокон – 0,3 % от массы цемента, минимальная плотность пенобетона соответствует марке D400.

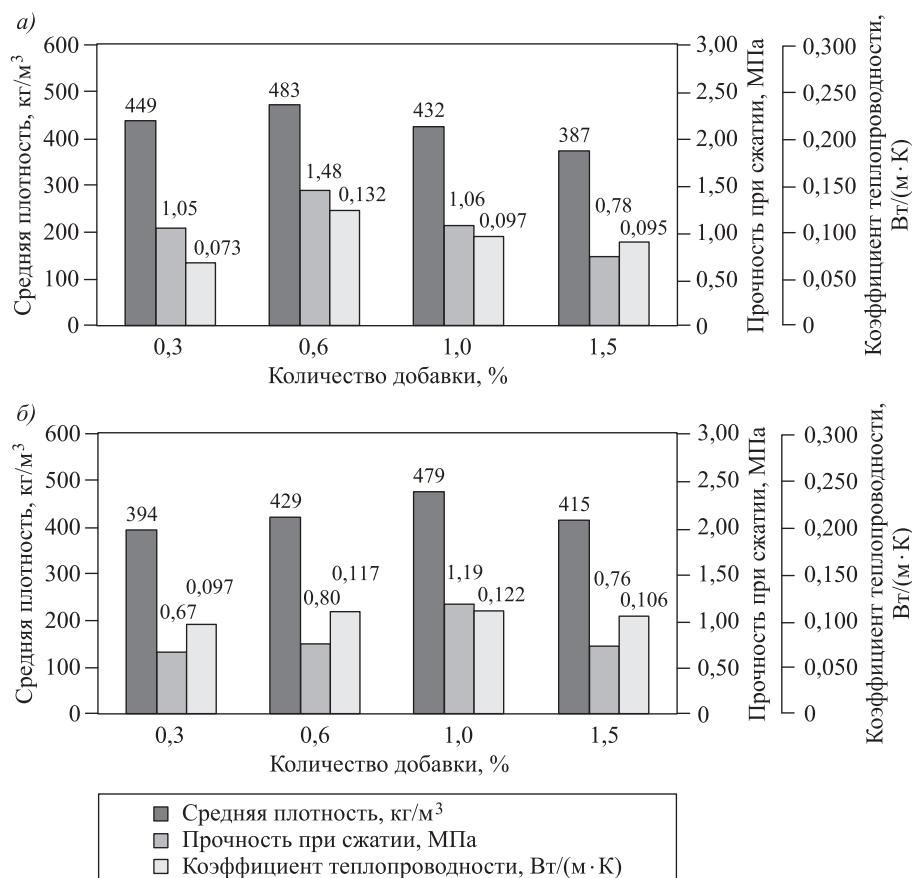


Рис. 2. Влияние базальтовых (а) и стеклянных (б) волокон на свойства пенобетона

По результатам исследований для получения теплоизоляционного пенобетона с дисперсными добавками рекомендуется вводить волластонит с удельной поверхностью 90–306 м²/кг, диопсид с удельной поверхностью 116–309 м²/кг в количестве 1–2,5 %. Введение минеральных добавок в пенобетон позволяет уменьшить его теплопроводность (см. табл. 1). При использовании диопсида коэффициент теплопроводности несколько ниже, чем при использовании волластонита.

Волластонит Ca₃[Si₃O₉] и диопсид CaMg[Si₂O₆]) являются силикатами кальция, т.е. природными аналогами клинкерных минералов [20], что обеспечивает более прочное адгезионное сцепление новообразований твердеющего цементного теста с поверхностью силикатных добавок. Это подтверждается результатами рентгеноструктурного анализа. У образцов с волластонитовой добавкой интенсивность дифракционного отражения гидроксида кальция (49,20 нм) выше по сравнению с контрольными образцами, что возможно при большей степени гидратации цемента.

Введение волокнистых добавок обеспечивает армирование пенобетона. Электронная микроскопия показала, что при использовании минеральных дисперсных добавок в структуре пенобетона присутствуют игольчатые кристаллы гидросиликатов кальция, которые участвуют в ее микроармировании (рис. 3).

Таблица 1. Влияние вида, удельной поверхности и способа введения минеральной добавки на свойства пенобетона

Вид добавки	Удельная поверхность, м ² /кг	Количество, мас. %								
		1			2,5			4		
		ρ_{cp} , кг/м ³	λ , Вт/(м · К)	$R_{cж}$, МПа	ρ_{cp} , кг/м ³	λ , Вт/(м · К)	$R_{cж}$, МПа	ρ_{cp} , кг/м ³	λ , Вт/(м · К)	
<i>Введение добавки в пену</i>										
Волластонит	90	415	0,119	1,37	435	0,105	0,55	638	0,122	1,56
	306	420	0,082	0,97	502	0,097	1,00	512	0,117	1,34
	574	545	0,093	2,1	404	0,104	1,05	783	0,134	2,95
Диопсид	116	345	0,088	1,02	560	0,108	1,47	664	0,130	1,54
	309	401	0,073	1,22	450	0,096	2,74	563	0,079	1,39
	714	488	0,101	1,14	463	0,086	1,06	530	0,110	1,43
<i>Введение добавки в растворную смесь</i>										
Волластонит	90	375	0,070	1,00	395	0,107	0,55	449	0,114	1,61
	306	420	0,075	0,94	435	0,103	1,19	444	0,085	1,3
	574	361	0,083	0,73	406	0,095	1,18	436	0,094	1,94
Диопсид	116	274	0,069	0,57	377	0,097	0,79	520	0,105	1,22
	309	433	0,074	1,58	467	0,091	0,88	477	0,091	0,69
	714	434	0,084	1,37	461	0,090	0,77	424	0,076	0,73

Примечание. При 0 мас. % $\rho_{cp} = 547$ кг/м³; $\lambda = 0,122$ Вт/(м · К); $R_{cж} = 1,22$ МПа.

В табл. 2 представлены оптимальные составы пенобетона естественного твердения с минеральными волокнистыми и дисперсными добавками, для которых сопоставимость расхода составляющих определяется в процентном соотношении. Разница в коэффициенте теплопроводности объясняется разным характером пористой структуры межпоровых перегородок. Для меньших показателей коэффициента теплопроводности характерна повышенная микропористость. Полученный пенобетон обладает преимущественно закрытой пористостью, что способствует улучшению показателей морозостойкости.

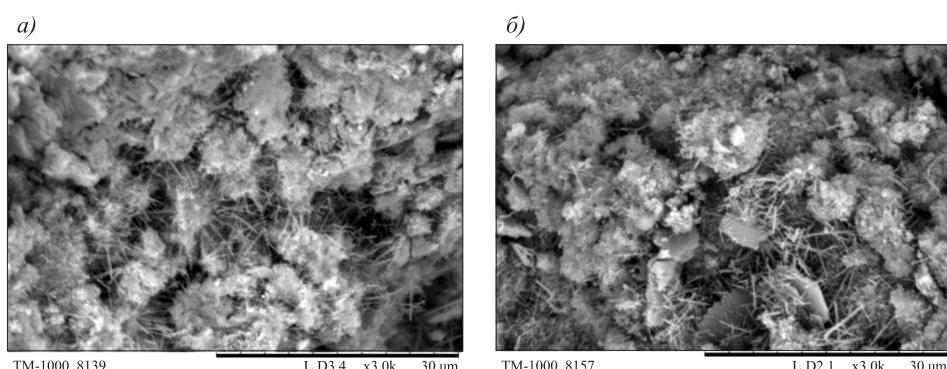


Рис. 3. Микроструктура образцов пенобетона с диопсидом (a) и волластонитом (b) (увеличение $\times 3000$)

Таблица 2. Составы разработанного пенобетона с минеральными и волокнистыми добавками

Компонент состава	Без добавок	Диопсид	Волластонит	Стеклянная фибра	Базальтовая фибра
Портландцемент, кг	330	163	225	225	275
Зола-уноса, кг	200	98	135	135	165
Вода, л	267	148	205	205	250
Пенообразователь, л	1,44	0,69	0,95	0,95	1,16
Добавка, кг	0	1,63	2,25	0,68	0,83

Из результатов статистической обработки показателей средней плотности и прочности при сжатии оптимальных составов пенобетона следует, что при введении дисперсных волластонитовых и диопсидовых добавок в пенобетонную смесь заметно снижаются коэффициенты вариации по прочности при сжатии (с 17,4 до 3,2 и 8,4 % соответственно) и средней плотности (с 6,8 до 2,9 и 4,8 % соответственно), свидетельствующие об однородности структуры и стабильности свойств полученных материалов (табл. 3). Наименьший показатель коэффициента вариации соответствует пенобетону с добавкой волластонита, более высокий – диопсида. В случае волокнистых добавок коэффициенты вариации меняются незначительно, что можно объяснить сложностью их равномерного распределения в объеме пенобетона. Разработаны технические условия на пенобетон с дисперсными и волокнистыми добавками.

Достоверность научных результатов и практических рекомендаций подтверждилась промышленной апробацией составов и технологии в ООО «Монолит-Бетон» (г. Новосибирск). Физико-механические свойства пенобетона, модифицированного минеральными дисперсными и волокнистыми добавками, удовлетворяют требованиям нормативных документов. Себестоимость 1 м³ разработанного модифицированного пенобетона с диопсидом и волластонитом составляет 1474,1 и 1776,4 руб. соответственно. Средняя

Таблица 3. Физико-механические показатели разработанного пенобетона

Показатели	Без добавок	Диопсид	Волластонит	Стеклянная фибра	Базальтовая фибра
Средняя плотность, кг/м ³	547	274	375	394	449
Предел прочности при сжатии, МПа	1,22	0,57	1,00	0,67	1,05
Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии, Вт/(м · °C)	0,122	0,069	0,070	0,097	0,073
Предел прочности при изгибе, МПа	0,95	0,70	0,84	0,72	1,08
Марка по морозостойкости	20	25	25	25	25
Усадка пластическая, мм/м	7,20	6,08	5,70	2,94	2,81
Усадка при высыхании, мм/м	2,6	2,0	1,7	3,1	2,8

цена на рынке пенобетона с маркой по плотности D300–D400 за 1 м³ 2900 руб. Это позволяет в реализации рассчитывать на прибыль с 1 м³ пенобетона при введении диопсида – 865,9 руб., волластонита – 375,4 руб. при одновременном улучшении показателей теплопроводности материала.

Выводы. Для приготовления теплоизоляционного пенобетона естественного твердения установлены оптимальное содержание и удельная поверхность минеральных модифицирующих добавок: содержание волластонита и диопсида – 1–2,5 %, а базальтовых и стеклянных волокон – 0,3 %.

В пенобетонной смеси с волокнистыми добавками повышается агрегативная устойчивость, вследствие этого снижается средняя плотность пенобетона до 387–394 кг/м³ и уменьшается теплопроводность материала до 0,070–0,097 Вт/(м · °C).

Воздействие дисперсных минеральных добавок обеспечивает более полную гидратацию цемента, что способствует при введении в состав растворной смеси 1 % дисперской добавки волластонита с удельной поверхностью 90 м²/кг уменьшению усадки при высыхании на 34 % и пластической усадки на 21 %, а дисперской добавки диопсида с удельной поверхностью 116 м²/кг на 23 и 16 % соответственно за счет лучшего адгезионного контакта и упрочнения (уплотнения) межпоровых перегородок вследствие армирования цементного камня игольчатыми кристаллами гидросиликатов кальция.

Разработанные составы и технология пенобетона были успешно апробированы в промышленных условиях и могут быть использованы в ограждающих конструкциях зданий и сооружений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моргун Л.В., Черенкова И.А. Архитектурно-художественная выразительность изделий из фибропенобетона // Материалы международной научно-практической конференции «Строительство–2015: Современные проблемы строительства». Ростов н/Д, 2015. С. 447–450.
2. Стешенко А.Б., Кудяков А.И. Раннее структурообразование пенобетонной смеси с модифицирующей добавкой // Инж.-строит. журн. 2015. № 2. С. 56–62.
3. Prabha P., Palani G.S., Lakshmanan N., Senthil R. Behaviour of steel-foam concrete composite panel under in-plane lateral load // Journal of Constructional Steel Research. 2017. Vol. 139. P. 437–448.
4. Mikulica K., Labaj M., Hela R. Rehabilitation of Floor Structures Using Foam Concrete // Procedia Engineering. 2017. Vol. 195. P. 108–113.
5. Анисакова Т.В., Рахимбаев Ш.М. Пенобетоны для интенсивных технологий строительства. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. 128 с.
6. Wan K., Wang G. Li, Sh., Pang Ch. 3D full field study of drying shrinkage of foam concrete // Cement and Concrete Composites. 2017. Vol. 82. P. 217–226.
7. Бездородов В.Г., Завадский В.Ф., Никулина Т.Ю. К вопросу об устойчивости минерализованных пен для получения материалов ячеистой структуры // Изв. вузов. Строительство. 2002. № 12. С. 29–33.
8. Кудяков А.И., Белых С.А., Лебедева Т.А. Стеновые теплоизоляционные материалы и изделия из наполненных пеностекольных композиций. Томск: Изд-во ТГАСУ, 2016. 191 с.
9. Лотов В.А., Сударев Е.А. Влияние хлористого натрия и углекислого кальция на реологические характеристики синтетических пенообразователей в производстве пенобетона // Изв. Том. политехн. ун-та. 2012. Т. 320, № 3. С. 50–52.

10. Кудяков А.И., Стешенко А.Б. Пенобетон дисперсно-армированный теплоизоляционный естественного твердения // Вестн. ТГАСУ. 2014. № 2. С. 127–133.
11. Бартенева Е.А., Машкин Н.А. Исследование свойств модифицированного пенобетона // Стройт. материалы. 2017. № 10. С. 36–40.
12. Shah H.R., Weiss J. Quantifying shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using the ring test // Materials and Structures. 2006. № 9. Р. 887–899.
13. Yooa D.-Y., Bantia N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: a review // Cement and Concrete Composites. 2016. Vol. 73. Р. 267–280.
14. Моргун Л.В., Виснап А.В., Воргин Д.А. К вопросу о газоудерживающих свойствах пенобетонных смесей // Материалы научно-практической конференции «Строительство и архитектура–2017: Современные проблемы строительства». Ростов н/Д, 2017. С. 210–215.
15. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов // Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. М.: Изд-во АСВ, 2004. 560 с.
16. Гутников С.И., Лазоряк Б.И., Селезнев А.Н. Стеклянные волокна. М.: Изд-во МГУ, 2010. 53 с.
17. Обзор рынка непрерывного стекловолокна и изделий из него в СНГ. М.: Информайн, 2018.
18. Завадский В.Ф. Технология изоляционных строительных материалов и изделий. Ч. 1: Стеновые материалы и изделия. М.: Академия, 2012. 189 с.
19. Bartenjeva E., Mashkin N. Technological parameters influence on the non-autoclaved foam concrete characteristics // AIP Conference Proceedings 3. 2017. Р. 020012.
20. Бердов Г.И., Ильина Л.В., Зырянова В.Н. Влияние минеральных наполнителей на свойства композиционных строительных материалов. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2013. 124 с.

Машкин Николай Алексеевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: nmashkin@yandex.ru
Новосибирский государственный технический университет

Кудяков Александр Иванович, д-р техн. наук, проф.;
E-mail: kudyakov@mail.tomsknet.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Бартенева Екатерина Анатольевна, асп.; E-mail: ek.bartenjeva@yandex.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 30.07.18

Mashkin Nikolay Alekseevich, DSc, Professor; E-mail: nmashkin@yandex.ru
Novosibirsk State Technical University, Russia

Kudyakov Aleksander Ivanovich, DSc, Professor; E-mail: kudyakov@mail.tomsknet.ru
Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Bartenjeva Ekaterina Anatoljevna, Post-graduate Student; E-mail: ek.bartenjeva@yandex.ru
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

NON-AUTOCLAVED FOAM CONCRETE, DISPERSION-REINFORCED WITH MINERAL OR FIBROUS ADDITIVES

It was found that the introduction of dispersed wollastonite and diopside additives, as well as glass and basalt fibers increases the aggregate stability of the foam concrete

mixture, reduces the average density and thermal conductivity of non-autoclaved foam concrete, increases the resistance of the porous structure. Heat-insulating foam concrete with dispersed wollastonite and diopside additives with an average density of 274–375 kg/m³, thermal conductivity coefficient of 0,07 W/(m · °C) and shrinkage at drying of 1,7–2,0 mm/m, as well as with basalt and glass fibers, respectively, 394–449 kg/m³, 0,07–0,09 W/(m · °C) and 2,8–3,1 mm/m with more uniform parameters of foam concrete quality. Foam concrete with additives is economically feasible to use for the device enclosing structures of buildings.

К e y w o r d s: non-autoclave foam concrete, foamer, mineral additives, fibrous additives, stability of cellular structure, shrinkage, average density, thermal conductivity.

REFERENCES

1. M o r g u n L.V., C h e r e n k o v a I.A. Arkhitekturno-khudozhestvennaya vyrazitel'nost' izdeliy iz fibropenobetona [Architectural-artistic expressiveness of articles of reinforced foam concrete]. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Stroitel'stvo–2015: Sovremennye problemy stroitel'stva» [Materials of the international scientific-practical conference «Building–2015: modern problems of construction»]. Rostov on Don, 2015. Pp. 447–450. (in Russian)
2. S t e s h e n k o A.B., K u d y a k o v A.I. Rannee strukturoobrazovanie penobetonnoy smesi s modifitsiruyushchey dobavkoj [Early structure formation in the concrete mixture with a modifying additive]. Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal [Civil engineering journal]. 2015. No. 2. Pp. 56–62. (in Russian)
3. P r a b h a P., P a l a n i G.S., L a k s h m a n a n N., S e n t h i l R. Behaviour of steel-foam concrete composite panel under in-plane lateral load. Journal of Constructional Steel Research. 2017. Vol. 139. Pp. 437–448.
4. M i k u l i c a K., L a b a j M., H e l a R. Rehabilitation of Floor Structures Using Foam Concrete. Procedia Engineering. 2017. Vol. 195. Pp. 108–113.
5. A n i k a n o v a T.V., R a k h i m b a e v Sh.M. Penobetony dlya intensivnykh tekhnologiy stroitel'stva [Foam concrete for intensive construction technologies]. Belgorod, 2015. 128 p. (in Russian)
6. W a n K., W a n g G. Li, Sh., P a n g Ch. 3D full field study of drying shrinkage of foam concrete. Cement and Concrete Composites. 2017. Vol. 82. Pp. 217–226.
7. B e z b o r o d o v V.G., Z a v a d s k i y V.F., N i k u l i n a T.Yu. K voprosu ob ustoychivosti mineralizovannykh pen dlya polucheniya materialov yacheistoy struktury [On the stability of mineralized foams for the production of cellular materials]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2002. No. 12. Pp. 29–33. (in Russian)
8. K u d y a k o v A.I., B e l y k h S.A., L e b e d e v a T.A. Stenovye teploizolyatsionnye materialy i izdeliya iz napolnennykh penostekol'nykh kompozitsiy [Wall heat-insulating materials and products from filled foam-glass compositions]. Tomsk, 2016. 191 p. (in Russian)
9. L o t o v V.A., S u d a r e v E.A. Vliyanie khloristogo natriya i uglekislogo kal'tsiya na reologicheskie kharakteristiki sinteticheskikh penoobrazovateley v proizvodstve penobetona [Influence of sodium chloride and calcium carbonate on rheological characteristics of synthetic foaming agents in foam concrete production]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [News of Tomsk Polytechnic University]. 2012. Vol. 320, No. 3. Pp. 50–52. (in Russian)
10. K u d y a k o v A.I., S t e s h e n k o A.B. Penobeton dispersno-armirovannyy teploizolyatsionnyy estestvennogo tverdeniya [Foam dispersion-reinforced insulation aging]. Vestnik TGASU [Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building]. 2014. No. 2. Pp. 127–133. (in Russian)

11. Bartenjeva E.A., Mashkin N.A. Issledovanie svoystv modifitsirovannogo penobetona [The study of the properties of the modified foam]. Stroitel'nye materialy [Building material]. 2017. No. 10. Pp. 36–40. (in Russian)
 12. Shah H.R., Weiss J. Quantifying shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using the ring test. Materials and Structures. 2006. No. 9. Pp. 887–899.
 13. Yooa D.-Y., Bantia N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: a review. Cement and Concrete Composites. 2016. Vol. 73. Pp. 267–280.
 14. Morgun L.V., Visnap A.V., Votrin D.A. K voprosu o gazouderzhivayushchikh svoystvakh penobetonnykh smesey [On the question of gas-retaining properties of foam concrete mixtures]. Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Stroitel'stvo i arkhitektura–2017: Sovremennye problemy stroitel'stva” [Materials of the international scientific-practical conference “Building and architecture–2017”]. Rostov on Don, 2017. Pp. 210–215. (in Russian)
 15. Rabinovich F.N. Kompozity na osnove dispersno-armirovannykh betonov. [Composites based on dispersed reinforced concrete]. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstruktsii [Questions of theory and design, technology, design]. Moscow, 2004. 560 p. (in Russian)
 16. Gutnikov S.I., Lazoryak B.I., Sleznev A.N. Steklyannye volokna [Glass fibers]. Moscow, 2010. 53 p. (in Russian)
 17. Obzor rynka nepreryvnogo steklovolokna i izdeliy iz nego v SNG [Overview of the market of continuous fiberglass and products from it in the CIS]. Moscow, 2018. (in Russian)
 18. Zavadskiy V.F. Tekhnologiya izolyatsionnykh stroitel'nykh materialov i izdeliy. P.1. Stenovye materialy i izdeliya [Technology of insulating building materials and products. Wall materials and products]. Moscow, 2012. 189 p. (in Russian)
 19. Bartenjeva E., Mashkin N. Technological parameters influence on the non-autoclaved foam concrete characteristics. AIP Conference Proceedings 3. 2017. P. 020012.
 20. Berdov G.I., Il'ina L.V., Zyrjanova V.N. Vliyanie mineral'nykh mikronapolniteley na svoystva kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov [Influence of mineral micro-filters on the properties of composite building materials]. Novosibirsk, 2013. 124 p. (in Russian)
-

УДК 691.57

В.И. ЛОГАНИНА, Т.А. НИЗИНА, Е.Б. МАЖИТОВ

ОЦЕНКА ПОРИСТОСТИ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЗОЛЬ СИЛИКАТНОЙ КРАСКИ

Приведены сведения о пористости покрытий на основе золь силикатной краски. Для оценки поровой структуры покрытий применяли метод островов среза. Для реализации данного метода использовали программный комплекс «Идентификация и анализ пористости строительных материалов». Показано различие в значениях пористости покрытий на основе силикатной и золь силикатной краски. Установлено, что поровая структура покрытий на основе силикатной краски представлена порами размером 10, 50 и 100 мкм. Выявлено, что количество пор на 1 см² на поверхности покрытий на основе золь силикатной краски меньше в 6 раз по сравнению с покрытием на основе силикатной краски. Определены фрактальная размерность поровой структуры покрытия, водопоглощение при капиллярном всасывании растворных образцов, окрашенных силикатной и золь силикатной краской.

Ключевые слова: жидкое стекло, полисиликатный раствор, краска, покрытие, пористость.

В практике отделочных работ хорошо зарекомендовали себя силикатные краски. С целью повышения срока службы силикатных покрытий предложена модификация пленкообразующего – жидкого стекла полимерными добавками (полимерными дисперсиями, кремнийорганическими соединениями и др.) [1–6]. Анализ патентной и научно-технической литературы свидетельствует, что одним из способов модификации является введение в состав связующего золя кремниевой кислоты, что обеспечивает более высокие эксплуатационные свойства покрытий. В работах [7, 8] предложено использовать в качестве связующего в силикатных красках полисиликатные растворы, имеющие силикатный модуль от 4 до 25.

Нами разработан состав краски на основе полисиликатного связующего, полученного смешиванием жидкого стекла с золем кремниевой кислоты [9, 10]. Было установлено, что покрытия на основе полисиликатных растворов характеризуются более быстрым отверждением. Краска образует покрытие с ровной однородной матовой поверхностью. Стойкость к статическому действию воды при температуре 20 °C составляет не менее 24 ч.

В настоящей работе поставлены следующие задачи исследования:

- определить проницаемость покрытий в соответствии с ГОСТ 33355–2015 (ISO 7783:2011) «Материалы лакокрасочные. Определение характеристик паропроницаемости. Метод чашки»;
- провести сравнительный анализ пористой структуры покрытия;
- оценить защитные свойства покрытий на основе золь силикатной краски.

В работе применяли калиевое жидкое стекло с модулем $M = 3,29$. В качестве наполнителя использовали микрокальцит марки МК-2

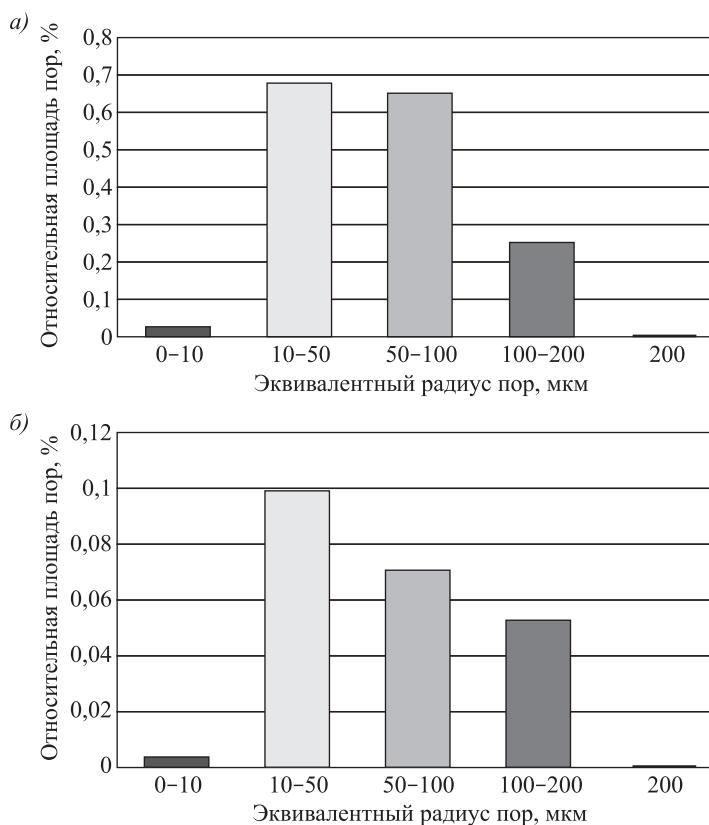


Рис. 1. Относительная площадь пор на покрытии на основе силикатной (а) и золь силикатной (б) краски

(ТУ5743-001-91892010–2011), маршалит и тальк марки МТ-ГШМ (ГОСТ 19284–79), в качестве пигмента – диоксид титана 230 рутильной формы (ТУ 2321-001-1754-7702–2014). Для получения полисиликатного связующего применяли золи кремниевой кислоты Nanosil 20 и Nanosil 30, выпускаемые ПК «Промстеклоцентр».

Установлено, что коэффициент паропроницаемости покрытий на основе калиевого полисиликатного связующего, определенный в соответствии с ГОСТ 33355–2015, составляет 175,48 г/м² · сут, а на основе калиевого жидкого стекла – 117,96. В стационарных условиях массовая скорость потока водяного пара через образец покрытия на основе калиевого жидкого стекла – 0,0108 г/ч, а на основе калиевого полисиликатного связующего – 0,0161. Увеличение числовых значений коэффициента паропроницаемости и скорости потока водяного пара через образцы покрытий на основе полисиликатных связующих свидетельствует об изменении их поровой структуры по сравнению с покрытиями на основе жидкого стекла.

Для оценки поровой структуры покрытий применяли метод островов среза. Для реализации данного метода использовали программный комплекс «Идентификация и анализ пористости строительных материалов», позволяющий определять суммарную площадь пор исследуемого композита, а также распределение пор по размерам (В.П. Селяев, Т.А. Низина, О.А. Фролкин, В.В. Цыганов, Ю.А. Ланкина. Идентификация и анализ пористости строи-

тельных материалов // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2006610364 от 24.01.2006 г. в Роспатенте по заявке № 2005613072 от 24.11.2005).

Установлено, что поровая структура покрытий на основе силикатной краски представлена в основном порами размером 10, 50 и 100 мкм (рис. 1, а). Максимальный размер пор составляет 174 мкм. На 1 см² поверхности покрытия 564 поры. Суммарная площадь пор на покрытии площадью 1 см² составляет 1609 526 мкм². Относительная площадь пор приведена в таблице.

Относительная площадь пор покрытий, %

Радиус, мкм	Силикатная краска	Золь силикатная краска
0–10	0,02596	0,004
10–50	0,67918	0,09933
50–100	0,65119	0,07087
100–200	0,25319	0,05294

Поровая структура покрытий на основе золь силикатной краски представлена в основном порами таких же размеров 10, 50 и 100 мкм, максимальный размер пор – 156 мкм. Однако количество пор на 1 см² поверхности покрытия меньше и составляет 90 шт. Суммарная площадь пор на покрытии площадью 1 см² составляет 227 141 мкм² (рис. 1, б). Относительная площадь пор представлена в таблице.

Величину фрактальной размерности определяли по углу наклона графика изменения площадей пор от их периметров, построенного в двойных логарифмических координатах $\log(A(\delta)) - \log(P(\delta))$ (рис. 2).

Из анализа данных видно, что связь между периметром и площадью пор, полученная при сканировании исследуемых поверхностей с различным разрешением 4800 Dpi описывается линейной зависимостью с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,9973\text{--}0,9982$ (рис. 2).

Анализ данных о фрактальной размерности свидетельствует о более развитой поровой структуре покрытий на основе силикатной краски. Фрактальная размерность поровой структуры покрытия на основе силикатной краски равна $D = 2,1487$, а золь силикатной краски – 2,1343.

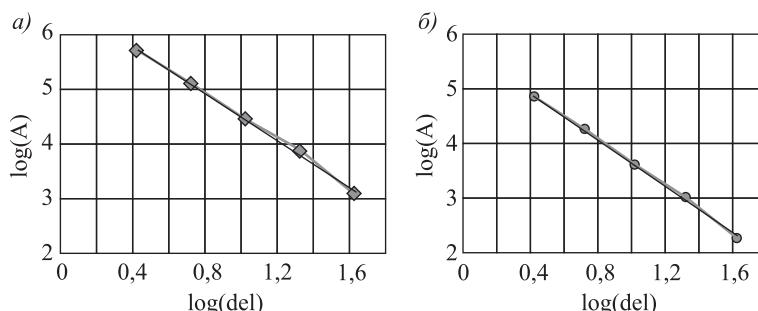


Рис. 2. Связь между периметром и площадью пор покрытия на основе силикатной (а) и золь силикатной (б) краски

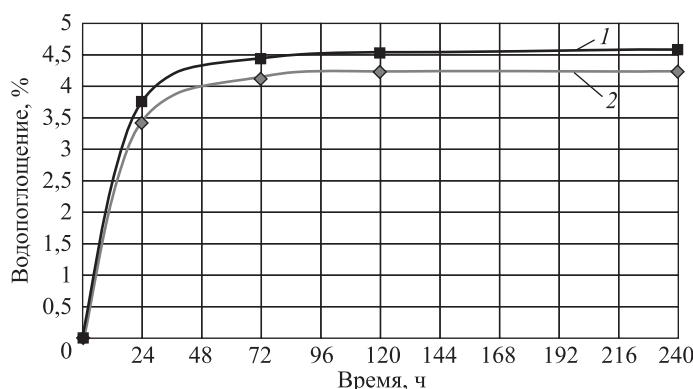


Рис. 3. Кинетика водопоглощения при капиллярном всасывании окрашенных растворных образцов
1 – силикатной краской; 2 – золь силикатной краской

Различная пористость покрытий на основе силикатной и золь силикатной краски определяет их различные защитные свойства. Так, при оценке водозащитных свойств покрытий установлено, что водопоглощение при капиллярном всасывании растворных образцов, окрашенных золь силикатной краской, составляет 4,4 %, а окрашенных силикатной краской – 4,6 % (рис. 3).

Красочный состав и покрытия на его основе обладают следующими свойствами: удобонаносимость хорошая; вязкость по ВЗ-4 17–20 с; усадки и наличия трещин нет; жизнеспособность более 90 сут; время высыхания до степени 5 – 15–25 мин; адгезия 1 балл; адгезия 1,1–1,3 МПа; коэффициент паропроницаемости 175,48 г/м² · сут; прочность при ударе (по ГОСТ 6806–73) 50 см; смываемость не более 2 г/м². После 24 ч выдержки в воде отсутствуют белые матовые пятна, отслаивание, сыпь, пузыри и другие разрушения. Марка морозостойкости F35.

Выводы. Применение полисиликатного раствора в качестве пленкообразующего в силикатных красках способствует повышению защитных свойств и стойкости покрытий. По своим свойствам золь силикатная краска и покрытие на ее основе соответствуют требованиям, предъявляемым к покрытиям для наружной отделки зданий, обладают более высокой адгезией, достаточной паропроницаемостью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Figovskiy O.L., Beylin D.A. Nanostructured silicate polymer concrete // Vestnik MGSU. 2014. No. 3. P. 197–204.
- Figovsky O., Borisov Yu., Beilin D. Nanostructured binder for acid-resisting building materials // J. scientific israel-technological advantages. 2012. Vol. 14, No. 1. P. 7–12.
- Kudryavtsev P.G. Alkoxides of chemical elements – promising class of chemical compounds which are raw materials for Hi-Tech industries // J. scientific israel-technological advantages. 2014. Vol. 16. No. 2. P. 147–170.
- Tryba B., Wrobel R. J., Homma P. Improvement of photocatalytic activity of silicate paints by removal of K₂SO₄ // Atmospheric environment. 2015. Vol. 115. P. 47–52.

5. Li Sanxi, Ding Junyong, Shawgi Nazar, Qi Shan. Effect of organic montmorillonite on the performance of modified waterborne potassium silicate zinc-rich anti-corrosion coating // Research on chemical intermediates. 2016. Vol. 42, Iss. 4. P. 3507–3521. DOI: 10.1007/s11164-015-2228-6.
6. G o o d a r z i I m a n M i r z a i e, F a r z a m M a n s o u r, S h i s h e s a z M o h a m m a d R e z a et al. Eco-friendly, acrylic resin-modified potassium silicate as water-based vehicle for anticorrosive zinc-rich primers // Journal of applied polymer science. 2014. Vol. 13, Iss. 12.
7. Получение и применение гидрозолей кремнезема: Труды МХТИ им. Д.И. Менделеева / Под ред. Ю.Г. Фролова. М., 1979.
8. Айлер Р. Химия кремнезема: В 2 т. М.: Мир, 1982.
9. Логанина В.И., Мажитов Е.Б. Формирование качества внешнего вида покрытий на основе полисиликатных растворов // Региональная архитектура и строительство. 2018. № 3. С. 75–79.
10. Логанина В.И., Кислицина С.Н., Мажитов Е.Б. Длительная прочность покрытий на основе золь силикатной краски // Вестн. МГСУ. 2018. Т. 13, вып. 7. С. 877–884.

Логанина Валентина Ивановна, д-р техн. наук, проф.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Низина Татьяна Анатольевна, д-р техн. наук, доц.

Мордовский государственный университет, г. Саранск

Мажитов Еркебулан Бисенгалиевич, асп.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Получено 02.07.18

Loganina Valentina Ivanovna, DSc, Professor

Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Nizina Tatyana Anatolyevna, DSc, Ass. Professor

Mordovia State University, Saransk, Russia

Mazhitov Erkebulan Bisengalievich, Post-graduate Student

Penza State University of Architecture and Construction, Russia

ESTIMATION OF THE POROSITY OF COATINGS BASED ON THE SIL OF SILICATE PAINT

Information on the porosity of coatings based on sol silicate paints is given. To estimate the pore structure of the coatings, the cut-off island method was used. To implement this method, the software complex “Identification and analysis of the porosity of building materials” was used. The difference in the porosity of the coatings on the basis of silicate and sol silicate paints is shown. It was established that the pore structure of coatings based on silicate paint is represented mainly by pores of 10, 50 and 100 microns in size. It was found that the number of pores per 1 cm² on the surface of coatings based on silica paint solids is 6 times less compared to the coating based on silicate paint. The fractal dimension of the pore structure of the coating was determined. Determination of water absorption during capillary suction of mortar samples stained with silicate and sol with silicate paint.

К e y w o r d s: liquid glass, polysilicate solution, paint, coating, porosity.

REFERENCES

1. Figovskiy O.L., Beylin D.A. Nanostructured silicate polymer concrete. *Vestnik MGSU*. 2014. No. 3. Pp. 197–204.
 2. Figovsky O., Borisov Yu., Beilin D. Nanostructured binder for acid-resistant building materials. *J. scientific israel-technological advantages*. 2012. Vol. 14, No. 1. Pp. 7–12.
 3. Kudryavtsev P.G. Alkoxides of chemical elements – promising class of chemical compounds which are raw materials for Hi-Tech industries. *J. scientific israel-technological advantages*. 2014. Vol. 16, No. 2. Pp. 147–170.
 4. Tryba B., Wrobel R. J., Homma P. Improvement of photocatalytic activity of silicate paints by removal of K_2SO_4 . *Atmospheric environment*. 2015. Vol. 115. Pp. 47–52.
 5. Li Sanxi, Ding Junyong, Shawgi Nazar, Qi Shan. Effect of organic montmorillonite on the performance of modified waterborne potassium silicate zinc-rich anti-corrosion coating. *Research on chemical intermediates*. 2016. Vol. 42, Iss. 4. Pp. 3507–3521. DOI: 10.1007/s11164-015-2228-6.
 6. Goodarzi Iman Mirzaie, Farzam Mansour, Shishesaz Mohammadi Reza et al. Eco-friendly, acrylic resin-modified potassium silicate as water-based vehicle for anticorrosive zinc-rich primers. *Journal of applied polymer science*. 2014. Vol. 13, Iss. 12.
 7. Poluchenie i primenie gidrozoley kremnezema [Preparation and use of silica hydrosols]. Moscow, 1979. (in Russian)
 8. Ailer P. Khimiya kremnezema [Chemistry of silica]. Moscow, 1982. (in Russian)
 9. Loganina V.I., Mazhitov E.B. Formirovanie kachestva vneshnego vida pokrytiy na osnove polisilikatnykh rastvorov [Formation of the quality of the appearance of coatings based on polysilicate solutions]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo* [Regional architecture and construction]. 2018. No. 3. Pp. 75–79. (in Russian)
 10. Loganina V.I., Kislytsina S.N., Mazhitov E.B. Dlitel'naya prochnost' pokrytiy na osnove zol' silikatnoy kraski [The durability of coatings based on sol silicate paint]. *Vestnik MGSU* [Bull. MSSU]. 2018. Vol. 13, Iss. 7. Pp. 877–884. (in Russian)
-

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ, ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКОЛОГИИ



УДК 711.4-112(571.1/.5)

Е.В. КОСИНОВА

ЭКОЛОГО-ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НАУЧНЫХ ЦЕНТРОВ В СИБИРИ

Развитие эколого-градостроительных особенностей функционирования наукоградов приобретает особую актуальность и значимость. В статье рассматриваются проблемы сохранения элементов природной экосистемы при организации наукоградов в Западной Сибири, что является особенно важным для социально-экономического развития региона, при этом определяются периоды развития, архитектурно-планировочные особенности, что должно послужить инструментом в их дальнейшем развитии и создании новых наукоградов. Примером могут служить наукограды Новосибирской области – Новосибирский академгородок, Краснообск, Кольцово. В настоящее время эти города формируются в единый наукополис. Изучение поэтапного развития наукоградов позволяет проследить и сформулировать основные особенности их градоформирования и сложившегося архитектурно-художественного облика.

Ключевые слова: агломерация, этапы развития, функционально-планировочные особенности, среда города, научный город, научный центр, функциональные зоны, общественное ядро, система коммуникаций.

Анализ формирования научных центров представляет значительный исследовательский интерес при рассмотрении возникающих актуальных проблем и перспектив развития на этапе преобразования в настоящее время.

Началом их создания в Сибири считается середина XX в., 50-е гг., в связи с появлением системы интеллектуальных центров, значение которых для дальнейшего развития страны чрезвычайно велико.

При исследовании данной темы была изучена и систематизирована информация, полученная из литературных источников, документов, натурного обследования наукоградов. Согласно новейшему определению, наукограды – это моноориентированные городские поселения, градообразующими предприятиями которых являются научные и научно-производственные предприятия [1].

Проанализировав генезис научных центров Западной Сибири, определили три этапа исторического развития:

1. 50–60-е гг. XX в. – формирование научных центров.
2. Конец 80-х – 90-е гг. XX в. – создание новых территориальных и организационных образований, стагнация их.

3. Начало XXI в. – наиболее активное развитие наукоградов, как важнейших точек роста научного потенциала.

Первый этап – 50–60-е гг. XX в. Научные центры развивались по принципу филиализации, описанном в конце 1950-х гг. академиком РАН Б.М. Кедровым [2, 3].

Первым научным центром в Сибири стал Новосибирский академгородок, основанный 18 мая 1957 г., явившийся своеобразной матрицей для создававшихся позднее научных центров в других странах, так как отразил основные особенности новой системы функциональной организации производственной и селитебной зон, а главное корреляцию Академгородка с ядром агломерации – Новосибирском. Проект генерального плана Академгородка был разработан в середине 50-х гг. XX в. авторским коллективом Новосибирского проекта под руководством архитекторов И. Путешева, С. Пономарева, Н. Симонова, Ю. Ушакова и др. [4].

Академгородок расположен в 25 км от центра Новосибирска, является его спутником с самостоятельными градообразующими функциями, характер взаимосвязей с центром тяготения которого обусловлен интенсивными трудовыми и культурно-бытовыми связями [5]. Основой генерального плана стал градоэкологический каркас, так как будущий наукоград располагался в природной лесной зоне, со смешанным лесом. Идея планировочной структуры заключалась в создании наиболее благоприятных условий жизни населения, позволяющих сочетать удобство благоустроенности и комфорта с непосредственной близостью к природе.

В генеральном плане были намечены основные функциональные зоны, располагающиеся в определенной логической последовательности: комплекс корпусов, отделенных от селитебной территории зеленою санитарно-защитной полосой (шумо- и ветрозащита); селитебная зона, сформированная по принципу микрорайонирования с максимальным сохранением лесных массивов. Зона научно-исследовательских институтов находится в северо-восточной части городка, где здания группируются с учетом их научных особенностей и территориальных резервов для дальнейшего развития. Эта территория была в основном свободна от лесных насаждений и расположена с подветренной стороны. К побережью Обского водохранилища примыкает зона отдыха и спорта, а коммунально-складская зона (в северной части городка) – к комплексу научно-исследовательских институтов. Лес со стороны водохранилища несет как ветроснегозащитную функцию от соответствующих здесь юго-западных ветров, так и шумозащитную – от транспортных транзитных магистралей [6].

При реализации проекта генерального плана Академгородка были использованы принципы организации функционального зонирования, отразившиеся в застройке Верхней и Нижней зон Академгородка с размещением между ними научно-исследовательских институтов и санитарно-защитной зоны. Нижняя зона Академгородка, где в 1960-е гг. были осуществлены идеи микрорайонирования (микрорайоны «Щ» и «Д») с застройкой из кирпича справа от въезда в научный городок и панельной – слева, также отразила создание комфортной среды для жителей этих микрорайонов, так как селитебная зона находится среди природного зелено-

го массива, что делает застройку эстетически привлекательной. Каркасная коттеджная застройка была рассчитана на прилегающие абсолютно не тронутые лесные зоны – территория у каждого коттеджа была значительной.

Основная жилая зона – наиболее благоприятная в гигиеническом и ландшафтном отношениях. Зеленые участки в жилой застройке превращаются в парки, микрорайонные сады и скверы [7]. Композиционную структуру зоны размещения научных учреждений Академгородка можно определить как единую систему связанных и последовательно расположенных лабораторных комплексов на свободных от леса территориях [4]. Академгородок внес новое качество в жизнь Новосибирска, став импульсом развития агломерационных процессов и мобильности населения [8].

Основными особенностями создания и функционирования Академгородка являлись:

1. Сохранение основных элементов экологического каркаса: больших зеленых массивов и водного пространства, использование особенностей рельефа в застройке.
2. Транспортная доступность Академгородка с мегаполисом.
3. Микрорайонирование в застройке Академгородка.

Другим примером строительства и функционирования наукоградов, созданных позже, служит Краснообск – городок Сибирского отделения Всесоюзной академии сельскохозяйственных наук им. В.И. Ленина (ВАСХНИЛ), также расположенный в пригородной зоне, в 18 км от Новосибирска. Концепция развития поселка в качестве самостоятельного научного центра была разработана ГипроНИИ АН СССР, с 1972 г. функции генерального проектировщика были переданы НО ГипроНИИ (А. Панфиль, Ю. Платонов, Г. Тюленин). Строительство началось в 1970 г. [8, 9]. Этот проект представлял собой второе поколение научных центров.

Как и Академгородок, Краснообск состоит из трех зон: научно-исследовательской с учебной базой, жилой и общественной. Но отличие заключается в архитектурно-планировочном решении. Зона научно-исследовательских институтов – не отдельно стоящие и обособленные здания институтов, а взаимосвязанный комплекс, планировка и инженерная основа которого созданы по единой модульной сетке. Это обеспечило компактность и экономичность застройки благодаря общим для всех институтов вспомогательным и обслуживающим службам, что особенно важно для региона с жесткими природно-климатическими особенностями.

В проекте использован прием сквозной модульной системы планировочных, объемных и конструктивных элементов, с умелым сочетанием архитектурных приемов: взаимодействие больших и малых пространств, контрастных и нюансных отношений, человеческого и ландшафтного масштабов, ритмики и цвета [7].

Научный центр проектировался по принципу унификации объемно-планировочных и градостроительных решений, с модульно-регуляционной системой. В организации функционально-пространственной структуры научного центра применялся комплексный подход с единой системой коммуникаций: инженерно-технических, транспортных и пешеходных.

Ее внедрение способствует экономии времени и денежных средств, повышению надежности работы технических устройств и безопасности передвижений.

Селитебная зона представляет собой жилые массивы научного центра, которые решены в форме трех кольцеобразных структур, состоящих из разноэтажных жилых домов, что заметно отличается от Академгородка. Внутри каждой структуры размещаются: жилая застройка, детские учреждения, объекты обслуживания и площадки отдыха. Поскольку поселок расположен на открытом пространстве, данное размещение обеспечивает замкнутую, более уютную и защищенную от ветров внутреннюю среду со своим микроклиматом [6].

Общественное ядро размещено в геометрическом фокусе с радиусом пешеходной доступности 300–500 м. Такая структура Краснообска и положение общественного центра позволяют при создании в дальнейшем линии метрополитена рассматривать его как межселенный общественно-транспортный узел, имеющий пешеходные подходы в границах городка и связанный скоростным транспортом с ближайшей системой расселения и Новосибирском.

В разработке систем объектов общественно-информационного обслуживания был использован двухступенчатый прием. Компактная организация всего городка и его отдельных зон обеспечила жителям пешеходные связи с центром, работой. В перспективе это планировалось и для связи с центром Новосибирска скоростным транспортом [9].

Основными особенностями создания и функционирования Краснообска являлись:

1. Сохранение лесостепного ландшафта, гармоничная и рациональная взаимосвязь между строящимися объектами и большими опытными полями.
2. Компактная организация пространства, обеспечивающая пешеходную связь с общественным центром и с центром Новосибирска.
3. Обособленные кольцеобразные жилые образования.

Еще одним примером создания городов науки в Западной Сибири служит Кольцово, расположенный также вблизи Новосибирска на расстоянии 25 км.

Первый генеральный план Кольцово был разработан в 1976 г. коллективом Новосибгражданпроекта под руководством А. Бондаренко. В основе эколого-градостроительного каркаса использовался окружающий лесной массив, прилегающий к планировке наукограда.

В Кольцово создавались укрупненные функциональные зоны, сосредоточивающие преимущественно однородные по назначению объекты. Недостатком проекта является увеличение расстояний между зонами, поэтому необходимо было создание развитой системы транспортных и инженерных коммуникаций, что стало негативным явлением в условиях Сибири.

В проектировании использован прием организации укрупненных блоков для научно-исследовательских учреждений на основе укрупненных функциональных зон [10]. Это позволило использовать преимущественно ком-

плексный подход к организации функционально-пространственной структуры научного центра. Особенность наукограда Кольцово – планомерное пространственное развитие, основанное на утверждаемой градостроительной документации.

Появление первых двух микрорайонов, их удаленность от заложенного на перспективу цента способствовали образованию компактного общественного пространства в освоенной части. В дальнейшем развитие общественного центра Кольцово происходило вдоль главных улиц поселка и на их пересечении (Никольского проспекта и проспекта Сандахчиева). Центральные функции поселка были смещены.

Основными особенностями создания и функционирования наукограда Кольцово являлись:

1. Использование зеленого массива на прилегающей к планировке территории.
2. Проектирование укрупненных функциональных зон.
3. Комплексный подход при строительстве.

В конце 1970-х гг. подобные научные центры в Сибири были организованы около г. Томска, на базе старейшего университета восточной части страны, основанного в 1888 г., и около г. Красноярска [1].

Второй этап – конец 80-х – 90-е гг. XX в. Развитие науки после распада СССР в 1990-е гг. стало носить иной характер, это касается научных городков, появившихся в середине XX в. Во-первых, к концу XX в. архитектурно-пространственная композиция Новосибирского академгородка уже сложилась, были созданы основные зоны с сохранением зеленых зон и прокладкой подземных коммуникаций (водоснабжение, канализация и т.д.). Но в связи с дальнейшим ростом населения необходимо было увеличить селитебные зоны. Таким вариантом стало создание точечной застройки сообразно заложенным сетям.

В настоящее время в Верхней зоне, кроме уже созданной первоначально коттеджной застройки для ученых, расположенной среди природных зеленых массивов, возведены современные 20–22-этажные жилые здания, построенные в экологически комфортной среде.

Значение и значимость Академгородка отразились в документах по Охране исторического наследия.

Третий этап – начало XXI в. В связи с пролонгацией проектирования научных центров на территории Сибири и развития уже существующих необходимо учитывать особенности, характерные для научных городков, созданных ранее, и устранять негативные явления.

Особенностями формирования научных центров в Сибири явились:

1. Создание градоэкологического каркаса (при сохранении элементов природной экосистемы и взаимосвязь с планировкой поселения).
2. Размещение научных центров – городков вблизи мегаполисов – ядер агломераций (в Новосибирской, Томской, Омской агломерациях).
3. Рациональная транспортная инфраструктура.
4. Современная система планировки производственной, селитебной и других зон с использованием новых типов сооружений и строительных конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А г и р р е ч у А.А. Особенности формирования наукоградов России // Проблемы урбанизации на рубеже веков. М.: МГУ, 2002. С. 24–25, 133.
2. Б о ч а р о в Ю.П., Ф р е з и н с к а я Н.Р. Пути пространственной организации отечественной науки // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 2. С. 100–106.
3. Г о р ю ш к и н Л.М. Памятники Новосибирской области/ [Сост. Л.М. Горюшкин, Б.И. Семко]. Новосибирск: Кн. изд-во, 1989. 200 с., ил.
4. П л а т о н о в Ю.П. Проектирование научных комплексов. М.: Стройиздат, 1977. С. 30.
5. А г и р р е ч у А.А. Наукограды России: история формирования и развития. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 2009. С. 77.
6. Б а л а н д и н С.Н. Новосибирск. История градостроительства 1945–1985 гг. Новосибирск: Кн. изд-во, 1986. С. 67.
7. Ж и д ч е н к о А.В. Архитектурно-планировочный и топонимический ландшафт наукоградов 1950–60-х гг. (по материалам институтской части Дубны и Новосибирского академгородка) // Баландинские чтения. 2013. № 1. С. 33.
8. О г л ы Б.И. Новосибирск: от прошлого к будущему. Новосибирск: Кн. изд-во, 1991. С. 119.
9. О г л ы Б.И. Формирование центров крупных городов Сибири. Градостроительные и социально-культурные аспекты. Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. ун-та, 1999. С. 104.
10. С а в е л ь е в Б. Архитектура научных комплексов // Архитектура СССР. 1976. № 2. С. 32.

Косинова Елена Владимировна, асп.

Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств

Получено после доработки 27.07.18

Kosinova Elena Vladimirovna, Post-graduate Student
Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts, Russia

ECOLOGICAL AND URBAN CONSTRUCTION FEATURES OF THE FUNCTIONING OF SCIENTIFIC CENTERS IN SIBERIA

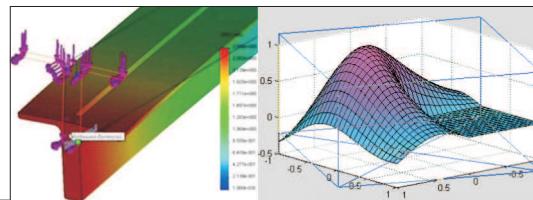
The development of environmental and town planning features of the functioning of science cities acquires special relevance and significance. This article discusses the problem of preserving elements of the natural ecosystem when organizing science cities in Western Siberia, which is especially important for the socio-economic development of the region, while identifying development periods, architectural and planning features – which should serve as a tool in their further development, creating new science cities. The main objects of study are the science cities of the Novosibirsk region the Novosibirsk Academgorodok, the village of Krasnoobsk, Koltsovo. Currently, these cities are formed into a single science policy. The study of the gradual development of science cities makes it possible to trace and formulate the main features of their town-forming and the established architectural and artistic appearance.

К e y w o r d s: agglomeration, development stages, functional planning features, city environment, scientific city, scientific center, functional zones, public core, communication system.

REFERENCES

1. Agirrech u A.A. Osobennosti formirovaniya naukogradov Rossii [Features of the formation of science cities of Russia]. Problemy urbanizatsii na rubezhe vekov [Problems of urbanization at the turn of the century]. Moscow, 2002. Pp. 24–25, 133. (in Russian)
2. Bocharov Yu.P., Frezinskaya N.R. Puti prostranstvennoy organizatsii otechestvennoy nauki [Ways of the spatial organization of domestic science]. Akademiya. Arkhitektura i stroitel'stvo [Academia. Architecture and construction]. 2015. No. 2. Pp. 100–106. (in Russian)
3. Goryushkin L.M. Pamyatniki Novosibirskoy oblasti [Monuments of the Novosibirsk region]. Novosibirsk, 1989. 200 p. (in Russian)
4. Platonov Yu.P. Proektirovaniye nauchnykh kompleksov [Design of scientific complexes]. Moscow, 1977. P. 30. (in Russian)
5. Agirrech u A.A. Naukogrady Rossii: istoriya formirovaniya i razvitiya [Science cities of Russia: the history of formation and development]. Moscow, 2009. P. 77. (in Russian)
6. Balandin S.N. Novosibirsk. Iстория градостроительства 1945–1985 гг. [Novosibirsk. History of town planning 1945–1985]. Novosibirsk, 1986. P. 67. (in Russian)
7. Zhidchenko A.V. Arkhitekturno-planirovochnyy i toponimicheskiy landscape naukogradov 1950–60-kh gg. [Architectural-planning and toponymic landscape of science cities of the 1950s – 60s]. Balandinskie chteniya [Balandin Readings]. 2013. No. 1. P. 33. (in Russian)
8. Ogly B.I. Novosibirsk: ot proshloga k budushchemu [Novosibirsk: from past to future]. Novosibirsk, 1991. P. 119. (in Russian)
9. Ogly B.I. Formirovaniye tsentrov krupnykh gorodov Sibiri. Gradostroitel'nye i sotsial'no-kul'turnye aspekty [Formation of the centers of large cities of Siberia. Town planning and socio-cultural aspects]. Novosibirsk, 1999. P. 104. (in Russian)
10. Savelyev B. Arkhitektura nauchnykh kompleksov [Architecture of scientific complexes]. Arkhitektura SSSR [Architecture of the USSR]. 1976. No. 2. P. 32. (in Russian)

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



УДК 528.7

С.Б. ВЕРДИЕВ

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ СХЕМ ПАРНЫХ ТАХЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И ПРИВЯЗКИ ТОЧЕК СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Для исследования деформаций различных строительных объектов и сооружений широко используются такие геодезические измерительные приборы, как электронные тахеометры, лазерные дальномеры, GPS измерители и т.д. Электронные тахеометры позволяют измерять деформации объектов с достаточной точностью путем контроля позиции выбранных контрольных точек на объекте. Целью исследований является качественное и количественное сравнение двух схем парных тахеометрических измерений при изучении относительных деформаций объектов: определение относительной деформации одним тахеометром путем контроля позиции двух точек на объекте; определение точности привязки одной контрольной точки на объекте двумя тахеометрами. Получена формула для вычисления оптимального расстояния между измерителем и объектом с учетом автокорреляционных показателей локальных температурных полей. Математически показано, что при некоторых допущениях суммарные погрешности могут быть идентичными при измерениях по двум следующим схемам: измерение одним электронным тахеометром взаимного положения двух контрольных точек; измерение двумя электронными тахеометрами привязки одной контрольной точки. Определены оптимальные режимы измерений в рассмотренных схемах. Предложена формула для вычисления оптимального расстояния между измерителем и объектом с учетом автокорреляционных показателей локальных температурных полей.

Ключевые слова: электронный тахеометр, деформация, метеофактор, погрешность, измерения, оптимизация, корреляция, обратная засечка, рефракция, атмосфера.

Как отмечается в [1–8]¹, появившиеся в последние годы новые средства измерения перемещений и деформаций – электронные тахеометры, или тотальные станции, дают возможность измерять достаточно малые величины относительных деформаций. Электронный тахеометр является геодезическим прибором для измерения расстояний и углов. Физически расстояния определяются по разности фаз испускаемого и отраженного луча. Для определения прямоугольных координат использу-

¹ Чернявцев А.А. Обзор безотражательных электронных тахеометров, предлагаемых ЗАО «ГЕОСТРОЙИЗЫСКАНИЯ». [Http://www.gsi.ru/art.php?id=83](http://www.gsi.ru/art.php?id=83) (дата обращения: 25.08.2017).

ются следующие формулы перехода от полярных координат к прямоугольным:

$$x = r \cos\phi, \quad y = r \sin\phi. \quad (1)$$

Результаты определения изменения положения контрольных точек на объекте позволяют оценить состояние исследуемого объекта. При этом необходимо периодически проверять привязку положения самого тахеометра методом обратной засечки.

Согласно [1], при наблюдении за деформациями алгоритм работы электронных тахеометров включает следующие шаги:

- установка на неподвижной точке и позиционирование относительно опорных точек, в качестве опорных точек используются пункты, определенные в локальной системе координат, и пункты государственной геодезической сети;
- определение контрольных точек на объекте;
- составление программы наблюдений за контрольными точками на объекте;
- ввод формул для вычисления расстояний между контрольными точками;
- проведение измерений по контрольным точкам и периодическая проверка положения тахеометра по опорным точкам.

Одним из наиболее распространенных типов электронных тахеометров является Leica TM30, которая имеет угловую точность измерения $0,5''$ и точность измерения расстояния от 1 мм до 1000 м.

Согласно работе [9], современные технические средства и соответствующие технологии измерений позволяют строить автоматизированные системы геодезического деформационного мониторинга (АСГДМ), которые уже реализованы в ряде проектов [10]. Например, подобная система была использована для измерений деформаций сооружений Волгоградского гидроузла.

Анализ результатов исследований по определению положений контрольных точек на гидroteхнических сооружениях (шлюзовые камеры) в [1, 9] показал, что наилучшие результаты были получены при удалении контрольных точек от тахеометра на расстояние не более 170–180 м. В настоящей статье мы рассмотрим условия появления оптимального режима при проведении вышеизложенных геодезических измерений и сделаем некоторые обобщения для выработки методик оптимальных геодезических измерений.

Рассмотрим две схемы геодезических измерений:

1. Измерение относительной деформации объекта по расстоянию между двумя контрольными точками с помощью одного электронного тахеометра (ЭТ).
2. Измерение положения привязки объекта по одной контрольной точке с помощью двух электронных тахеометров.

На рис. 1 приведены схемы вышеизложенных схем измерений.

Для проведения упрощенного анализа примем следующие допущения:

1. Погрешности всех ЭТ идентичны.

2. Влияние метеофакторов (температура и давление) идентично.

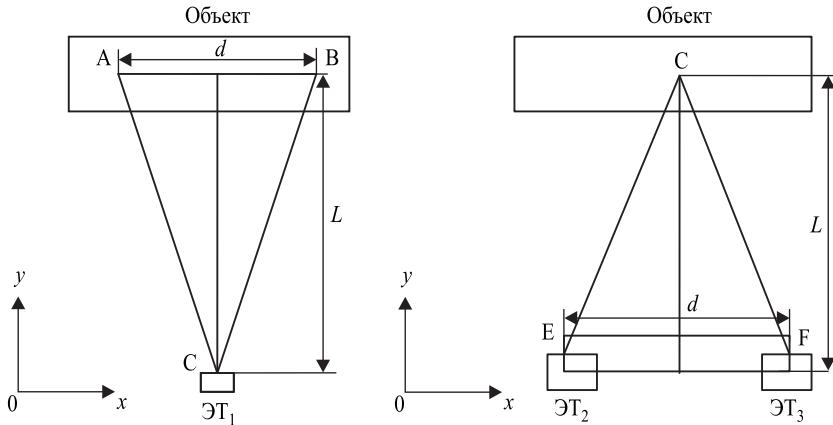


Рис. 1. Схемы измерений

3. Основным фактором, приводящим к возникновению погрешности измерений, являются метеофакторы.

4. Метеофакторы имеют пространственную автокорреляцию. Нормированный коэффициент автокорреляции метеофакторов имеет вид

$$r = e^{-(\alpha_x |x| + \alpha_y |y|)}, \quad (2)$$

где $\alpha_x, \alpha_y = \text{const.}$

5. Погрешность тахеометрических измерений, возникающая из-за метеофакторов, растет пропорционально длине измеряемой дистанции.

Проанализируем суммарную погрешность определения относительного смещения исследуемого объекта по первой схеме.

Если обозначить погрешность измерения электронного тахеометра, возникающую на единичной длине трассы как σ_0 , то на всей трассе АС или ВС суммарную погрешность определим как

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_1^2 + 2r\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2, \quad (3)$$

где σ_1 – суммарная погрешность определения точки А;

σ_2 – суммарная погрешность определения точки В;

r – коэффициент корреляции между σ_1 и σ_2 .

В то же время в соответствии с пятым допущением имеем

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_0 \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + L^2}, \quad (4)$$

где σ_0 – погрешность электронного тахеометра, приходящаяся на единичную длину трассы.

С учетом выражений (2–4) получим

$$2\sigma_0^2 = \left(\left(\frac{d}{2} \right)^2 + L^2 \right) [1 + e^{-(\alpha_x d + \alpha_y L)}]. \quad (5)$$

Нетрудно показать, что при вышепринятых допущениях вторая схема геодезических измерений (см. рис. 2, б) будет иметь суммарную погрешность, вычисляемую выражением, аналогичным формуле (5).

Так, суммарная погрешность контрольной точки также будет определяться формулой (3), где в данном случае σ_1 – погрешность определения точки С электронным тахеометром ЭТ₂, σ_2 – электронным тахеометром ЭТ₃. В этом случае суммарная погрешность позиции точки С также будет вычислена формулой (5).

Проанализируем свойства формулы (5). Покажем, что при $d = \text{const}$ σ_Σ имеет экстремум от L , при этом тип этого экстремума будет зависеть от величин α_x , α_y , d , L , σ_0 . Также при $L = \text{const}$, σ_Σ будет иметь экстремум от d , при этом тип экстремума будет зависеть от величин α_x , α_y , L .

Покажем это. Примем $d = \text{const}$. Имеем

$$\frac{d\sigma_\Sigma^2}{dL} = 4L\sigma_0^2[1+2e^{-(\alpha_x d + \alpha_y L)}] - 2\sigma_0^2\left(\left(\frac{d}{2}\right)^2 + L^2\right)2\alpha_y e^{-(\alpha_x d + \alpha_y L)}. \quad (6)$$

Для нахождения L_{opt} примем $\frac{d\sigma_\Sigma^2}{dL} = 0$. В этом случае L_{opt} может быть вычислен путем решения следующего уравнения

$$2L[1+e^{-(\alpha_x d + \alpha_y L)}] = \left(\frac{d^2}{4} + L^2\right)\alpha_i e^{-(\alpha_x d + \alpha_y L)}. \quad (7)$$

Очевидно, что оптимальная величина L будет зависеть от таких показателей, как α_x , α_y , d .

Аналогичным образом, можно показать, что при $L = \text{const}$ суммарная погрешность измерения будет иметь экстремум от d . При этом оптимальная точка будет определяться путем решения уравнения

$$d[1+e^{-(\alpha_x d + \alpha_y L)}] = \alpha_x \left(\frac{d^2}{4} + L^2\right) e^{-(\alpha_x d + \alpha_y L)}. \quad (8)$$

Очевидно, что значение d_{opt} будет зависеть от величин таких показателей, как α_x , α_y , L .

Чтобы наглядно показать наличие экстремума в функции (5), рассмотрим условие, когда

$$(\alpha_x d + \alpha_y L) \leq 0,15. \quad (9)$$

В этом случае имеем

$$e^{-(\alpha_x d + \alpha_y L)} \approx 1 - (\alpha_x d + \alpha_y L). \quad (10)$$

С учетом (5) и (10) получим

$$\sigma_\Sigma^2 = 2\sigma_0^2\left(\frac{d^2}{4} + L^2\right)(2 - \alpha_x d - \alpha_y L). \quad (11)$$

Исследуем (11) на экстремум от L до $d = \text{const}$. Имеем

$$\frac{d\sigma_{\Sigma}^2}{dL} = 4L\sigma_0^2(2 - \alpha_x d - \alpha_y L) - 2\sigma_0^2 \left(\frac{d^2}{4} + L^2 \right) \alpha_y. \quad (12)$$

При условии $\frac{d\sigma_{\Sigma}^2}{dL} = 0$ из (12) получим квадратное уравнение

$$L^2 + \frac{L(2\alpha_x d - 4)}{3\alpha_y} + \frac{\alpha_y d^2}{4 \cdot 3\alpha_y} = 0. \quad (13)$$

Решение уравнения (14) дает

$$L_{1,2} = -\frac{(2\alpha_x d - 4)}{6\alpha_y} + \sqrt{\left(\frac{(2\alpha_x d - 4)}{6\alpha_y}\right)^2 - \frac{\alpha_y d^2}{4 \cdot 3\alpha_y}}. \quad (14)$$

Для выяснения типа экстремума проведем следующее вычисление:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\sigma_{\Sigma}^2}{dL^2} &= 4\sigma_0^2(2 - \alpha_x d - \alpha_y L) - 4\sigma_0^2 L \alpha_y - 4\sigma_0^2 L \alpha_y = \\ &= -12\sigma_0^2 L \alpha_y + 8\sigma_0^2 - 4\sigma_0^2 d \alpha_x. \end{aligned} \quad (15)$$

Из (15) получим условие максимума

$$3\alpha_y L + \alpha_x d > 2 \quad (16)$$

и условие минимума

$$3\alpha_y L + \alpha_x d < 2. \quad (17)$$

Так как условие (16) противоречит условию (9), выбираем условие (17), т.е. величина σ_{Σ}^2 имеет минимум при выполнении неравенства (17)

$$d^2 - \frac{d(2 - \alpha_y L)}{(\alpha_x + \alpha_x/2)} + \frac{2\alpha_x L^2}{\alpha_x + \alpha_x/2} = 0. \quad (18)$$

Для практического подтверждения обнаруженных закономерностей обратимся к результатам аналогичных исследований². Отметим, что в данной работе аналогичная задача была рассмотрена в трехмерном случае в экспериментальном плане и были вычислены кривые зависимости по грешностей $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, R$ от расстояния между электронными тахеометрами и исследуемым объектом. Соответствующие экспериментальные кривые приведены на рис. 2.

Используя выражение (14), приведем следующий численный пример:

Примем $\alpha_x = \alpha_y = 0,0001$; $d = 10$.

В этом случае в соответствии с формулой (14) получим $L_{\text{opt}} = 136$ м.

² Kaloop M.R., Beshr A.A., Elshiekh M.Y. Using total station for monitoring the deformation of high strength concrete beams. http://www.cpas-egypt.com/PDF_ST/MosbehRKaloop/Researches/013.pdf (дата обращения: 25.08.2017).

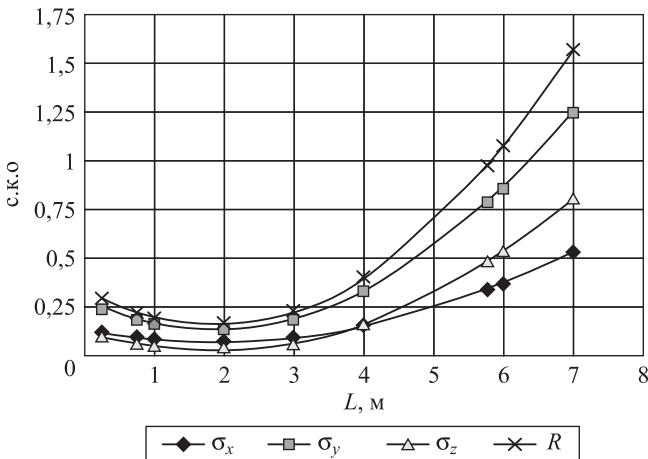


Рис. 2. Экспериментальные кривые зависимости среднеквадратического отклонения (с.к.о.) от расстояния до объекта

Нетрудно показать, что при заданных α_x , α_y , d и вычисленном L_{opt} условие (9) выполняется.

Таким образом, согласно приближенным подсчетам при $\alpha_x = \alpha_y = 0,0001$; $d = 10$ минимальную погрешность измерения позиции фиксированной точки можно получить при дистанции между объектом и тахеометрами, равной 136 м.

Отметим, что кривые на рис. 2 только подтверждают теоретическую возможность появления оптимального режима измерений, так как оптимальное значение L_{opt} , полученное в результате проведенного расчета, сильно отличается от значений, показанных на рис. 2.

Говоря о воздействии случайных изменений по пространству метеофакторов (t° , давление), приводящих к рефракции лазерного луча, необходимо отметить следующие причины их возникновения:

1. Появление многочисленных «тепловых островков» в урбанизированных территориях.
2. Ветры с изменчивой направленностью.
3. Нестабильная аэрозольная загрязненность атмосферы, в особенности береговых зон.

Суммарное воздействие вышеуказанных факторов вызывает возникновение локально неоднородных температурных полей, что в свою очередь приводит к появлению оптимальных режимов геодезических измерений, изложенных в настоящей статье.

Выводы. 1. При принятых некоторых допущениях суммарные погрешности измерений по двум схемам: измерение одним электронным тахеометром относительного положения двух контрольных точек и измерение двумя электронными тахеометрами привязки одной контрольной точки на объекте могут быть идентичными.

2. Показано наличие оптимальных режимов измерений в рассмотренных схемах геодезических измерений. Получена формула для вычисления опти-

мального расстояния между электронными тахеометрами и объектом с учетом автокорреляционных показателей локальных температурных полей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козлов Р.В., Ли В., Моргунов К.П. Использование современных средств измерения деформаций при исследовании сооружений Волгоградского гидроузла // Вестн. Гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2017. № 1. С. 95–110.
2. Воротников А.Л. Измерение осадок зданий и сооружений электронными тахеометрами // Вестн. УрГУ. 2005. № 13. С. 38–41.
3. Богданец Е.С., Черемухина О.О. Изучение процессов деформаций с использованием автоматизированной системы мониторинга // Вестн. Перм. исслед. политехн. ун-та. 2014. № 1. С. 82–90.
4. Mazalova J., Valentova K., Vlăkova L. Testing of accuracy of reflectorless distance measurement of selected Leica and Topcon total stations // Geoscience Engineering. 2010. Vol. 56, No. 1. P. 19–26.
5. Grabner M., Kvicera V. The wavelength dependent model of extinction in fog and haze for free space optical communication // Optics Express 3379. 2011. Vol. 190, No. 4. P. 19–26.
6. Lemmens M. Total stations: the Surveyors Workhorse. Features, status and Trends. URL: <http://www.gim-international.com/content/article/total-stations-the-surveyor-s-workhorse> (дата обращения: 16.07.2018)
7. Демтредер В. Современная лазерная спектроскопия. Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2014. 1071 с.
8. Ganesh K.E., Umesh T.K., Narasimhamurthy B. Atmospheric turbidity over a continental Station Mysore, India // Indian Journal of Radioand Space Physics. 2011. Vol. 40. P. 85–94.
9. Хиллер Б. Разработка и натурные испытания автоматизированной системы деформационного мониторинга // Вестн. СГУГИТ. 2016. Вып. 1. С. 48–62.
10. Хиллер Б. Цифровые инклинометры в системах автоматизированного геодезического мониторинга деформаций // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2015. № 6. С. 23–30.

Вердиев Сафаиль Багир оглы, ст. препод.; E-mail: Sefailverdiyev@gmail.com
Азербайджанский университет архитектуры и строительства, г. Баку, Азербайджанская Республика

Получено после доработки 27.07.18

Verdiyev Safail Baqir oglu, Senior Lecturer; E-mail: Sefailverdiyev@gmail.com
Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan Republic

THE ANALYSIS OF ACCURACY OF PAIRWISE SCHEMES OF MEASUREMENTS WITH TOTAL STATIONS OF RELATIVE DEFORMATIONS AND LINKS OF POINTS OF CONSTRUCTION OBJECTS

To research deformations of different construction objects and installations such geodesy measuring instruments as total stations, laser distance meters, GPS receivers are widely

used. The total stations make it possible to measure deformation of objects with sufficient accuracy carrying out control of positions of selected control points on the object. Aim of research is qualitative and quantitative comparison of following two schemes of pair wise taxeometrik measuring of relative deformations: determination of relative deformations using one total station by control of position of two points on the object; determination of accuracy of linking of single control point on the object using two total stations. The formula for calculation of optimum distance between total stations and object taking into account the autocorrelation parameters of local temperature fields is derived. Mathematically it is shown that upon some adopted assumptions the total error of measurements may be identical on two following schemes: measurements of two control points using one total station; measurement the position of a single control point using a pair of total stations. The optimum regimes for considered schemes are determined. The formula for calculation of optimum distance between the total stations and researched object taking into account the autocorrelation parameters of local temperature fields is proposed.

К e y w o r d s: total station, deformation, meteorological factors, error, measurements, optimization, correlation, inverse measurement, refraction, atmosphere.

REFERENCES

1. Kozlov R.V., Li V., Morgunov K.P. Ispol'zovanie sovremennoykh sredstv izmereniya deformatsiy pri issledovanii sooruzheniy Volgogradskogo gidrouzla [Use of modern measuring instruments of deformations at a research of constructions of the Volgograd water-engineering system]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova [Messenger of the State university of the sea and river fleet of the admiral S.O. Makarov]. 2017. No. 1. Pp. 95–110. (in Russian)
2. Voroshilov A.L. Izmerenie osadok zdaniy i sooruzheniy elektronnymi takheometrami [Measurement deposit of buildings and constructions electronic tacheometers]. Vestnik UrGU [USU Bulletin]. 2005. No. 13. Pp. 38–41. (in Russian)
3. Bogdanets E.S., Chermukhina O.O. Izuchenie protsessov deformatsiy s ispol'zovaniem avtomatizirovannoy sistemy monitoringa [Studying of processes of deformations with use of the automated system of monitoring]. Vestnik Permskogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Perm research polytechnical university]. 2014. No. 1. Pp. 82–90. (in Russian)
4. Mazalova J., Valentova K., Vlîkova L. Testing of accuracy of reflectorless distance measurement of selected Leica and Topcon total stations. Geoscience Engineering. 2010. Vol. 56, No. 1. Pp. 19–26.
5. Grabner M., Kvicera V. The wavelength dependent model of extinction in fog and haze for free space optical communication. Optics Express 3379. 2011. Vol. 190, No. 4. Pp. 19–26.
6. Lemmens M. Total stations: the Surveyors Workhorse. Features, status and Trends. Available at: <http://www.gim-international.com/content/article/total-stations-the-surveyor-s-workhorse> (Accessed 16.07.2018)
7. Demtreder V. Sovremennaya lazernaya spektroskopiya [Modern laser spectroscopy]. Dolgoprudnyy, 2014. 1071 p. (in Russian)
8. Ganesh K.E., Umesh T.K., Narasimhamurthy B. Atmospheric turbidity over a continental Station Mysore, India. Indian Journal of Radioand Space Physics. 2011. Vol. 40. Pp. 85–94.

9. Hiller B. Razrabotka i naturnye ispytaniya avtomatizirovannoy sistemy deformatsionnogo monitoringa [Development and natural tests of the automated system of deformation monitoring]. Vestnik SGUGiT [Messenger SSUGT]. 2016. Vol. 1. Pp. 48–62. (in Russian)
 10. Hiller B. Tsifrovye inklinometry v sistemakh avtomatizirovannogo geodesicheskogo monitoringa deformatsiy [Digital inclinometers in the systems of the automated Geodetic monitoring of deformations]. Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [News of Higher Education Institutions. Geodesy and Aerial Photography]. 2015. No. 6. Pp. 23–30. (in Russian)
-

УДК 536.27

Т.А. РАФАЛЬСКАЯ, В.Я. РУДЯК

О ПРИМЕНИМОСТИ СООТНОШЕНИЙ С ПОСТОЯННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМОВ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Теплообменные аппараты являются важной составляющей любых теплотехнических систем. Установочные характеристики позволяют определить производительность теплообменника в определенных установочных условиях, но при переменных режимах работы температуры теплоносителей на входе и выходе из теплообменника и их расходы оказываются неизвестными. Расчет режимов работы теплообменных аппаратов в условиях, отличных от установочных, с применением точных экспоненциальных формул становится невозможным, ввиду большого количества независимых переменных. Для решения этой задачи используют метод расчета теплообменных аппаратов по безразмерным комплексам при помощи приближенных формул. Методом моделирования определен диапазон взаимного изменения температур и расходов греющего и нагреваемого теплоносителей, при котором возможно применение приближенных формул на основе постоянных параметров теплообменников и величины возможной погрешности. Полученные данные могут использоваться для корректировки расчетов, а также для оценки целесообразности применения приближенных формул.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, теплоноситель, параметры теплообменника, характеристика теплообменника, коэффициент теплопередачи.

Введение. Поверхностные теплообменные аппараты (станционные регенеративные подогреватели, теплофикационные пароводяные и водоводяные подогреватели, водовоздушные и паровоздушные калориферы, регенеративные теплообменники систем вентиляции и т.п.) широко используются на тепловых электростанциях и в системах теплоснабжения. Постоянное применение требует точного знания их производительности и определения других характеристик. Поскольку внешние условия могут меняться в широком диапазоне (в частности, в аварийных режимах работы), прогнозирование функционирования системы оказывается совсем не простым.

Теория и методы расчета переменных режимов работы теплообменных аппаратов, обычно использующиеся на практике в нашей стране, были разработаны в середине XX столетия и основаны на соотношениях с постоянными параметрами (см. работы [1–8] и цитированную там литературу). Из общих соображений ясно, что эти соотношения не применимы при значительных изменениях расходов или перепадов температур. Понимание этого привело к появлению нескольких полуэмпирических корреляций [1–4, 6], однако, применимы они лишь для вполне определенных условий работы

отдельных теплообменников (не системы теплообменников). В этой связи необходимо понять область применимости существующих соотношений для расчета теплообменных устройств в переменных режимах работы. Решению этой задачи и посвящена данная работа. Кроме того, на практике, например, в тепловых пунктах, обычно используются группы теплообменников со связанный подачей теплоты, т.е. с перераспределением тепловых потоков между теплообменниками в переменном режиме работы. Расчет таких систем в рамках существующих методов фактически невозможен. Это делает задачу изучения и развития методов расчета теплообменных систем еще более актуальной.

1. Расчет режимов работы теплообменников. Тепловой баланс теплообменника и теплопередача при установившемся тепловом режиме описываются уравнениями

$$Q = kF\Delta t = W_l\delta t_s = W_s\delta t_l = \varepsilon W_s D_t = qD_t, \quad (1)$$

где Q – количество теплоты, Вт;

k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м² · °C);

F – площадь теплообменника, м²;

δt_l и δt_s – больший и меньший перепад температур теплоносителей в теплообменнике;

W_l , W_s – больший и меньший эквиваленты расходов теплоносителей, Вт/°C;

ε – безразмерная удельная тепловая производительность теплообменника;

D_t – максимальная разность температур между греющим и нагреваемым теплоносителями;

Δt – среднелогарифмическая разность температур между греющим и нагреваемым теплоносителями

$$\Delta t = (\delta t_l - \delta t_s)(\ln \delta t_l - \ln \delta t_s)^{-1}, \quad (2)$$

а q – тепловая производительность аппарата на 1 °C максимальной разности температур между греющим и нагреваемым теплоносителями, Вт/°C

$$q = \left[1 - e^{-kF \left(\frac{1}{W_s} - \frac{1}{W_l} \right)} \right] \left[\frac{1}{W_s} - \frac{1}{W_l} e^{-kF \left(\frac{1}{W_s} - \frac{1}{W_l} \right)} \right]^{-1}. \quad (3)$$

При переменных режимах работы теплообменного аппарата невозможно совместное решение в явном виде балансовых уравнений и уравнения теплопередачи при использовании среднелогарифмической разности температур (2). Поэтому, для того чтобы определить производительность теплообменника, а также расходы и температуры теплоносителей, приходится систему уравнений (1) решать подбором, и искомые переменные входят в решение в неявном виде [2, 5]. Обычно для решения этой системы уравнений используют либо метод последовательных приближений [4, 5], либо некоторые приближенные формулы [1, 3, 8].

В работах [2, 4, 6–8] было предложено упростить уравнение удельной тепловой производительности теплообменника (3), заменив среднелогарифмическую разность температур линейной зависимостью

$$\Delta t_* = D_t - a\delta t_s - b\delta t_l, \quad (4)$$

где a, b – постоянные коэффициенты, зависящие от схемы движения теплоносителей в теплообменнике (для противотока $a = 0,35$; $b = 0,65$).

Тогда удельная тепловая производительность теплообменника определяется так [2, 6, 8]

$$q = \frac{Q}{D_t} = \left[\frac{a}{W_l} + \frac{b}{W_s} + \frac{1}{kF} \right]^{-1}. \quad (5)$$

Использование этого уравнения позволяет существенно упростить расчет и снизить возможную ошибку. Действительно, в уравнение (5) входит обычно известная максимальная разность температур теплоносителей, тогда как в (3) для определения kF необходимо знать заранее неизвестную среднелогарифмическую разность температур (последняя находится лишь методом последовательных приближений). Неточность вычисления kF в процессе расчета переменного режима оказывается на итоговой точности определения величины удельной тепловой производительности значительно меньше, чем при решении уравнения (3). Наконец, использование трансцендентных уравнений (1)–(3) делает практически невозможным расчет переменного режима нескольких взаимосвязанных теплообменников, тогда как современные схемы тепловых пунктов систем теплоснабжения включают группу взаимосвязанных теплообменников с перераспределением тепловых потоков в переменном режиме.

Вместе с тем применение и уравнения (3), и уравнения (5) требует предварительного определения коэффициента теплопередачи. Это, однако, само по себе является непростой задачей, поскольку k в общем случае зависит от физических свойств греющей и нагреваемой сред, их скоростей и температур, конструктивных особенностей и размеров теплообменника, условий омывания поверхностей нагрева. Чтобы упростить расчет удельной тепловой производительности теплообменных аппаратов, в работах [2, 5–7] предложено вместо kF использовать для водоводяных теплообменников соотношение

$$kF = \Phi_0 \sqrt{W_p W_h}, \quad (6)$$

где W_p, W_h – эквиваленты расходов первичного (греющего) и вторичного (нагреваемого) теплоносителей;

Φ_0 – тепловая производительность аппарата, отнесенная к 1°C средней разности температур и единице расходов греющего и нагреваемого теплоносителей. Она зависит от величины поверхности нагрева аппарата, ее чистоты и конструктивных особенностей.

Предполагается [2, 5], что для данного аппарата при определенном состоянии его поверхности нагрева величина Φ_0 практически постоянна,

и поэтому ее можно считать параметром теплообменника. В то же время ясно, что значение этого параметра может меняться в зависимости от всех факторов, влияющих и на величину k [4].

Подставив (6) в (5), можно получить выражение, являющееся характеристикой теплообменника. В [2, 5] указывается, что в результате можно просто и с достаточной для практических целей точностью определить производительность теплообменника при переменном режиме, используя один параметр аппарата, вычисляемый расчетом или по данным испытаний (установочные данные). Соотношение (6) или ему подобные широко применяются на практике и сегодня [9–17], поскольку его основное достоинство состоит не в облегчении техники вычислений, а в получении возможности найти производительность теплообменника при произвольном режиме, отличном от установочного. До сих пор, однако, пределы применимости этой формулы не ясны. Для определения условий ее применимости в данной работе выполнено систематическое моделирование работы противоточного теплообменника в широком диапазоне изменения температур и расходов греющего и нагреваемого теплоносителей.

2. Алгоритм моделирования. В переменном режиме работы для теплообменника в общем случае известно изменение температуры греющего (первичного) и нагреваемого (вторичного) теплоносителей на входе в теплообменник в зависимости от изменения тепловой мощности $t_{p1}(Q)$, $t_{h1}(Q)$ и эквивалент расхода нагреваемого теплоносителя W_h . Исходя из этого, необходимо определить тепловую мощность теплообменника Q , температуры греющего и нагреваемого теплоносителей на выходе из теплообменника $t_{p2}(Q)$, $t_{h2}(Q)$ и расход греющего теплоносителя W_p . Решение уравнений (1)–(3) сводится к нахождению корней трансцендентных уравнений, поэтому в алгоритме метода последовательных приближений на начальном этапе применялись и приближенные формулы (4), (6). Ранее этот алгоритм успешно использовался для решения различных задач моделирования систем теплоснабжения (см. [18, 19] и цитированную там литературу).

Итак, в начальный момент параметр теплообменника Φ_0 в установочном режиме определялся по формуле (6), т.е. при заданных температурах теплоносителей на входе и выходе из теплообменника и при известных эквивалентах расходов первичного и вторичного теплоносителей Δt_c , а также заданной тепловой мощности Q_c

$$\Phi_0 = \frac{(kF)_c}{\sqrt{W_{pc}W_{hc}}}. \quad (7)$$

Затем определялась работа теплообменника в переменных режимах. Обычно в этом случае известен закон изменения одной из температур теплоносителя на входе в теплообменник $t_{p1}(Q)$, температуры второго теплоносителя на входе в теплообменник t_{h1} и эквивалента расхода одного из теплоносителей (W_h), который также может быть переменным (изменение W_h не зависит от Q).

В первом приближении тепловая мощность теплообменника находится из уравнения (1) при всех значениях t_{p1} в заданном диапазоне: $Q^I = \varepsilon^I W_s^I D_t$, где безразмерная удельная тепловая производительность теплообменника определяется по формуле [20]

$$\varepsilon^I(Q^I) = \left(a \frac{W_s^I}{W_l^I} + b + \frac{1}{\Phi_0} \sqrt{\frac{W_s^I}{W_l^I}} \right)^{-1} \leq 1, \quad (8)$$

а $D_t = t_{p1} - t_{h1}$; W_s^I принимается равным W_h .

Затем определяется температура нагреваемого теплоносителя на выходе из теплообменника: $t_{h2}^I = t_{h1} - Q^I / W_h$, а температура греющего теплоносителя на выходе из теплообменника принимается равной температуре нагреваемого теплоносителя на входе: $t_{p2}^I = t_{h1}$. Тогда эквивалент расхода греющего теплоносителя равен $W_p^I(Q) = Q^I / (t_{p1} - t_{h1})$. Во втором приближении по формуле (8) уточняется $\varepsilon^{II}(Q)$, затем — Q^{II} и $t_{h2}^{II} = t_{h1} - Q^{II} / W_h$, после чего эквивалент расхода греющего теплоносителя можно определить по формуле [20]

$$W_p^{II}(Q^{II}) \cong c \Phi_0^2 W_h \left[-1 + \sqrt{1 + d \Phi_0^2 \left(\frac{D_t W_h}{Q^{II}} - j \right)} \right]^{-2} \geq \frac{Q^{II}}{D_t}, \quad (9)$$

где c и d — коэффициенты, зависящие от соотношений расходов нагреваемого W_h и греющего W_p теплоносителей. Если $W_h < W_p$, то $c = 1,7$; $d = 2,6$; $j = a = 0,35$. Если $W_h > W_p$, то $c = 0,5$; $d = 1,4$; $j = b = 0,65$.

После определения W_p^{II} появляется возможность найти температурный напор в теплообменнике по формуле (2). Однако в данном приближении может оказаться, что $t_{p2}^{II}(Q^{II}) = t_{h1}$. В этом случае, вместо формулы (2) используется среднеарифметический температурный напор: $\Delta \tilde{t} = (\delta t_l + \delta t_s) / 2$.

В третьем приближении уже известны все входные значения температур и расходов греющего и нагреваемого теплоносителей, поэтому для расчета можно использовать точные экспоненциальные формулы [20]. В частности, безразмерная удельная тепловая производительность теплообменника определяется соотношением

$$\varepsilon^{III}(Q^{III}) = \frac{1 - \exp \left[\frac{-(kF)_2^{III}}{W_s} \left(1 - \frac{W_s}{W_l} \right) \right]}{1 - \frac{W_s}{W_l} \exp \left[\frac{-(kF)_2^{III}}{W_s} \left(1 - \frac{W_s}{W_l} \right) \right]} \leq 1, \quad (10)$$

где $(kF)_2^{III}$ вычисляется через среднелогарифмическую разность температур в теплообменнике при меняющихся тепловой мощности, расходах теплоно-

сителей и температурах теплоносителей на входе и выходе из теплообменника: $(kF)_2^{\text{III}} = Q^{\text{III}} / \Delta t^{\text{III}}$, причем Δt^{III} находится по формуле (2).

Для вычисления погрешности расчета с использованием постоянного параметра Φ_0 определялась величина $(kF)_1^{\text{III}}$ по формуле (6) при уточненных переменных значениях эквивалентов расходов и изменяющейся тепловой мощности теплообменника.

В случае, если эквивалент расхода нагреваемого теплоносителя больше чем греющего ($W_h^{\text{III}} > W_p^{\text{III}}$), последний определялся на основе уравнения (1): $W_p^{\text{III}}(Q^{\text{III}}) = Q^{\text{III}} / (\varepsilon^{\text{III}} D_t)$. В обратной ситуации ($W_h^{\text{III}} < W_p^{\text{III}}$) эквивалент расхода греющего теплоносителя можно установить, используя текущее значение параметра теплообменника и формулу (6)

$$W_p^{\text{III}}(Q^{\text{III}}) = \left[\frac{(kF)_2}{\Phi^{\text{III}}} \right]^2 \frac{1}{W_s} = \left[\frac{(kF)_2}{\Phi^{\text{III}}} \right]^2 \varepsilon^{\text{III}} D_t / Q^{\text{III}}, \quad (11)$$

где $\Phi^{\text{III}}(Q^{\text{III}})$ определяется по формуле (7) при $W_p^{\text{III}}(Q^{\text{III}}), W_h^{\text{III}}(Q^{\text{III}})$.

После третьего приближения проводилось дальнейшее уточнение температур и расходов теплоносителей до получения заданной сходимости. Сравнение итоговых величин $(kF)_1$ и $(kF)_2$ позволяет оценить отклонение параметра теплообменника от постоянного значения при различных соотношениях расходов и температур теплоносителей в теплообменнике, соответствующие данные приведены в следующем разделе.

3. Результаты моделирования. Основная задача данной работы состоит в изучении предположения Е.Я. Соколова [2, 5, 6] о незначительном влиянии изменения средних температур теплоносителей на коэффициент теплопередачи теплообменника. С этой целью выполнено пять серий расчетов различных переменных режимов работы теплообменного аппарата. В каждой серии расчетов был задан температурный график работы теплообменника, т.е. закон изменения температуры греющего теплоносителя на входе в теплообменник в зависимости от изменения его тепловой мощности.

В I серии расчетов температура первичного теплоносителя принята постоянной на входе в теплообменник $t_{p1} = \text{const}$ при любой Q (рис. 1, а). Средние температуры теплоносителей в этом случае меняются незначительно, но эквивалент расхода первичного теплоносителя во много раз может превысить установочное значение (рис. 1, б). На рис. 1, в показано изменение $(kF)_1$ (при постоянном Φ_0 в переменном режиме работы, т.е. без учета влияния температур теплоносителей на коэффициент теплопередачи) и $(kF)_2$ (с учетом влияния изменения температур теплоносителей на изменение коэффициента теплопередачи). Несмотря на большое изменение расхода первичного теплоносителя $(kF)_2 \approx (kF)_1$, параметр теплообменника незначительно отклоняется от установочного значения $\Phi \approx \Phi_0$ (рис. 1, г). При выполнении равенства $\Delta t = \delta t_l = \delta t_s$ (рис. 1, а) параметр $\Phi = \Phi_0$. Таким образом, в этом случае соотношение (6) теории Е.Я. Соколова [2, 5, 6] выполняется практически точно $(kF)_2 \approx \Phi_0 \sqrt{W_p W_h}$.

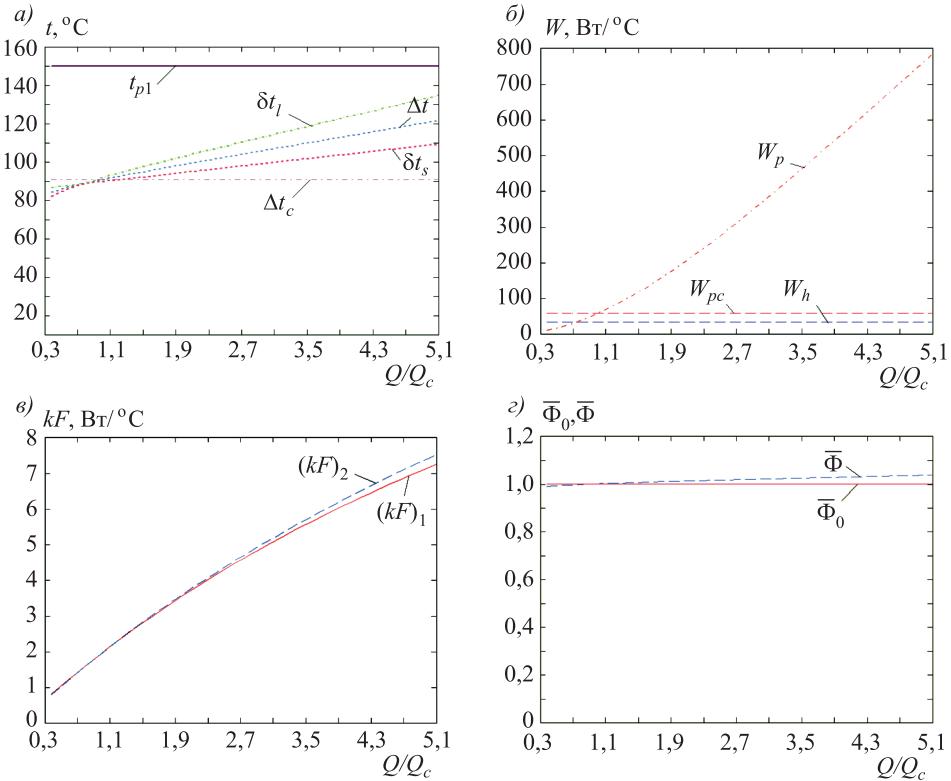


Рис. 1. Характеристики переменного режима работы теплообменника при постоянной температуре первичного теплоносителя на входе

а – изменение температур теплоносителей; б – изменение расходов теплоносителей; в – изменение kF ; г – относительные постоянный и переменный параметры теплообменника

Во II серии расчетов температура первичного теплоносителя на входе в теплообменник принята постоянной при $Q < Q_c$, затем повышается вместе с ростом Q (рис. 2, а). Параметр $(kF)_1$ в этом случае отличается от $(kF)_2$ примерно на 10 % в точке излома температурного графика первичного теплоносителя (сравни рис. 1, а и 1, в), но вдали от этой точки они практически совпадают. Параметр Φ не совпадает с Φ_0 (рис. 2, г), но это расхождение не превышает 10 % и максимально вблизи указанной точки излома температурного графика. Расход W_p при этом меняется значительно, при смене температурного графика – почти на порядок. Очевидно поэтому соотношение (6) выполняться не будет.

В III серии рассмотрен режим работы теплообменника при температурном графике, представленном на рис. 3, а. Здесь сначала, при $Q < Q_c$, температура первичного теплоносителя снижается с ростом тепловой мощности, а затем, при $Q \geq Q_c$, она постоянна. Такой режим часто встречается при работе теплообменника в качестве второй ступени подогревателя горячего водоснабжения в тепловом пункте. Температура первичного теплоносителя изменяется по отопительному графику [20], в котором температура сетевой воды варьируется в зависимости от требуемой тепловой мощности системы отопления. Тепловая мощность подогревателя горячего водоснабжения,

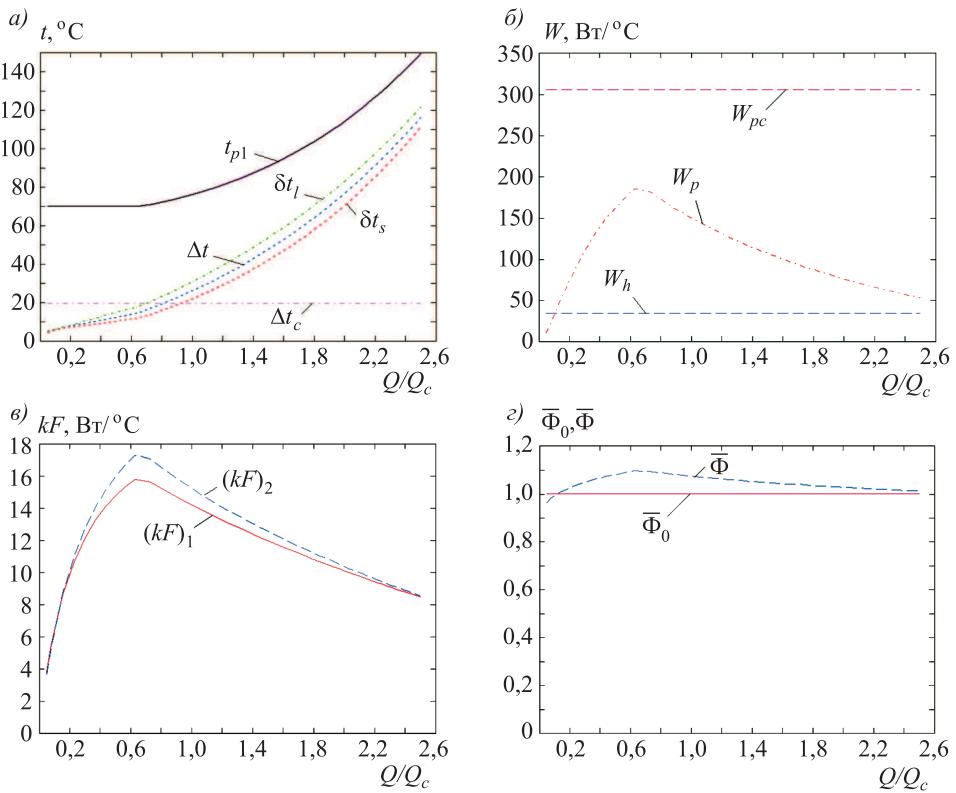


Рис. 2. Характеристики переменного режима работы теплообменника при повышении температуры первичного теплоносителя с ростом тепловой мощности

а – изменение температур теплоносителей; б – изменение расходов теплоносителей; в – изменение kF ; г – относительные постоянный и переменный параметры теплообменника

наоборот, минимальна при высоких температурах воды в тепловой сети, так как основная нагрузка приходится на подогреватель первой ступени и во вторую ступень приходит нагреваемая вода с достаточно высокой температурой.

В случае $Q \geq Q_c$ температура первичного теплоносителя на входе постоянна, поэтому при близких по величине расходах греющего и нагреваемого теплоносителей большая и меньшая разница температур на концах теплообменника, а также среднелогарифмический температурный перепад постоянны (см. рис. 3, а). В этом диапазоне параметр Φ остается постоянным, близки и расходы первичного и вторичного теплоносителей. Ясно, что в этой области соотношение (6) хорошо работает.

Напротив, при $Q < Q_c$ значительно увеличивается температурный перепад в теплообменнике, что приводит к резкому (почти на порядок) снижению расхода первичного теплоносителя (рис. 3, б). При этом, если Q/Q_c близко к единице, произведение $(kF)_2$ практически не отличается от $(kF)_1$. Однако при дальнейшем уменьшении мощности $(kF)_2$ все больше отстает от $(kF)_1$, и при малых значениях мощности это различие достигает 30 %. Практически согласованно с этим параметром уменьшается параметр Φ . Можно считать, что в этой области $(kF)_2 \sim \sqrt{W_p W_h}$,

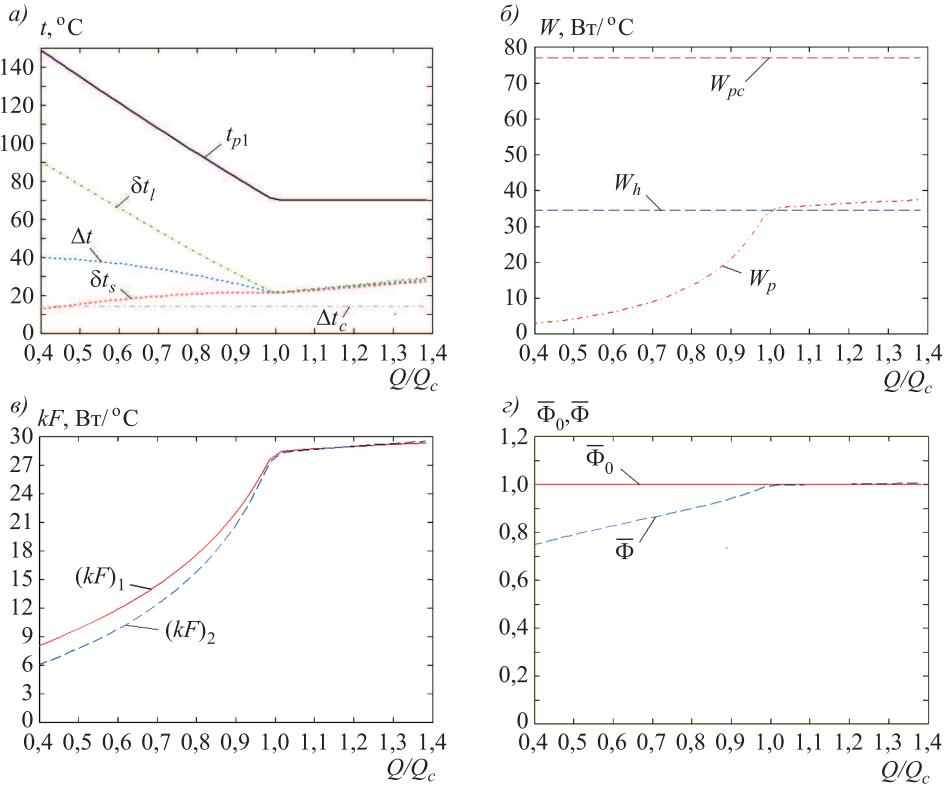


Рис. 3. Характеристики переменного режима работы теплообменника при понижении температуры первичного теплоносителя с ростом тепловой мощности
а – изменение температур теплоносителей; б – изменение расходов теплоносителей; в – изменение kF ; г – относительные постоянный и переменный параметры теплообменника

но поскольку расход W_p меняется значительно, формула (6) снова не применима.

Цель IV серии расчетов (рис. 4) – определить влияние изменения расходов теплоносителей на коэффициент теплопередачи, так как при одном и том же температурном напоре расходы теплоносителей могут различаться в зависимости от тепловой мощности теплообменника. Моделирование проводилось при постоянных температурах первичного и вторичного теплоносителей на входе в теплообменник: $t_{p1} = \text{const}$; $t_{h1} = \text{const}$. В этом случае температурный перепад почти постоянный и приблизительно равен установочному $\Delta t \approx \text{const} \approx \Delta t_c$ при любом изменении Q (рис. 4, а). Таким образом, практически устранено влияние средних температур теплоносителей на коэффициент теплопередачи. Однако при этих условиях имеет место значительное отклонение $(kF)_2$ от $(kF)_1$ (рис. 4, в) и соответственно параметра Φ от Φ_0 . И те, и другие параметры совпадают только в одной точке, где $\Delta t \approx \delta t_l \approx \delta t_s$ (см. рис. 4, а). В этой же точке оказываются равными и расходы W_p и W_h .

Значительное расхождение между установочным значением параметра Φ_0 и переменным Φ связано с тем, что при определении значения $(kF)_2$ при приблизительно постоянном Δt , $(kF)_2$ будет прямо пропорционально изме-

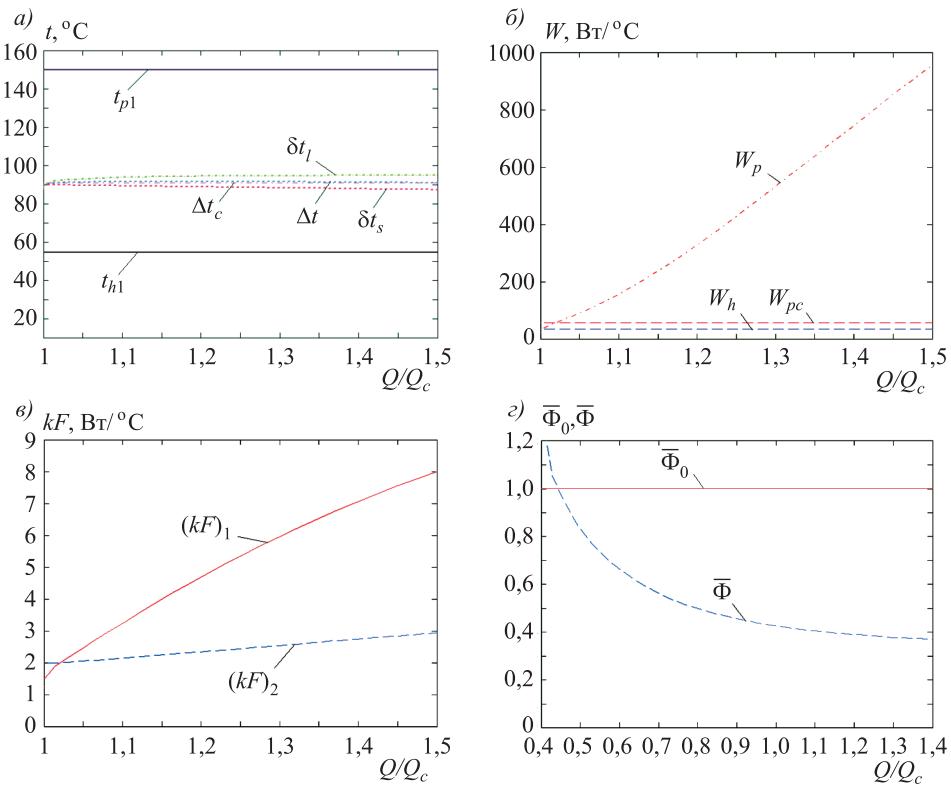


Рис. 4. Характеристики переменного режима работы теплообменника при постоянных температурах первичного и вторичного теплоносителей на входе

а – изменение температур теплоносителей; б – изменение расходов теплоносителей; в – изменение kF ; г – относительные постоянный и переменный параметры теплообменника

нению Q . В то же время при определении $(kF)_1$ через постоянный параметр Φ_0 по формуле (6), $(kF)_1$ будет прямо пропорционально величине $\sqrt{W_p W_h}$. Следовательно, и в этом случае использование формулы (6) не приводит к успеху.

В V серии расчетов (рис. 5) задавался тот же температурный график, что и в серии III, как наиболее неблагоприятный для работы теплообменника. Также были приняты постоянными и приблизительно одинаковыми эквиваленты расходов первичного и вторичного теплоносителей $W_p \approx W_h = \text{const}$ (рис. 5, б) при различной тепловой мощности теплообменника, чтобы обеспечить постоянный температурный перепад, равный большей и меньшей разности температур $\Delta t \approx \delta t_l \approx \delta t_s$ при любой тепловой мощности Q , когда во всех выполненных сериях параметр теплообменника Φ был практически равен Φ_0 . Однако в V серии $(kF)_2$ существенно отклоняется от $(kF)_1$ (рис. 5, в), а параметр теплообменника значительно отличается от установочного значения (рис. 5, г) в диапазоне мощностей, где Δt отклоняется от Δt_c (рис. 5, а). Отличие параметра Φ от установочного значения Φ_0 связано с тем, что $(kF)_2$ снижается как при уменьшении тепловой мощности Q , так и при увеличении температуры теплоносителей. Фактически изменения параметров Φ и $(kF)_2$ согласованы друг с другом, так что $(kF)_2 \sim \Phi$. С другой стороны,

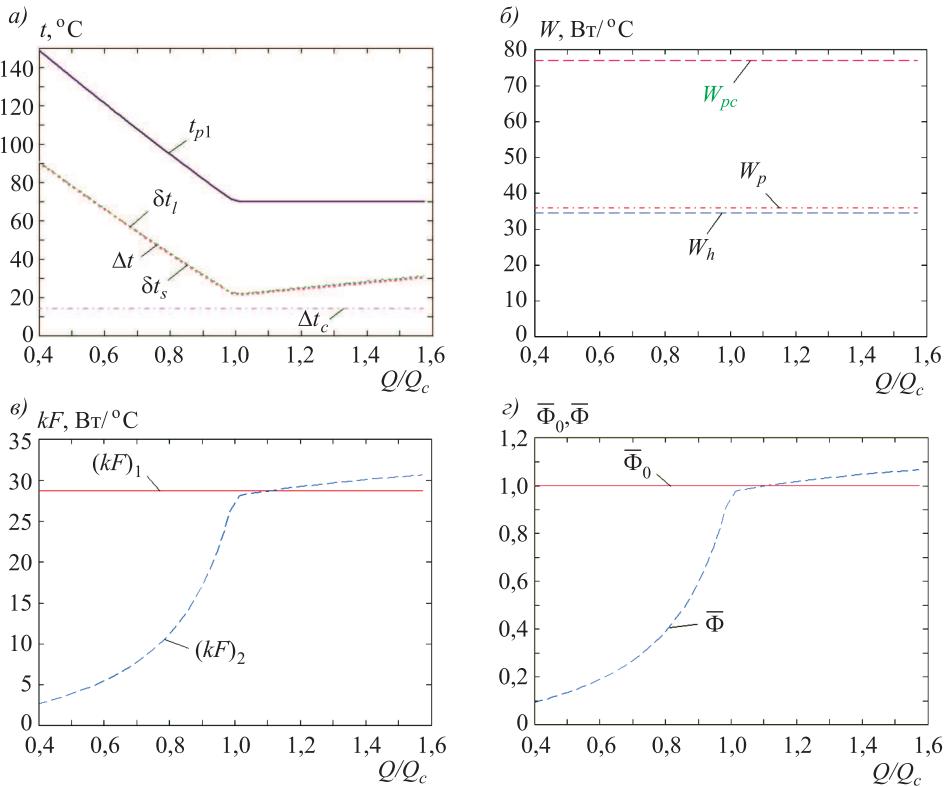


Рис. 5. Характеристики работы теплообменника при постоянных расходах первичного и вторичного теплоносителей

а – изменение температур теплоносителей; б – изменение расходов теплоносителей; в – изменение kF ; г – относительные постоянный и переменный параметры теплообменника

$(kF)_1 = \text{const}$ при любом режиме работы теплообменника, поскольку постоянны расходы теплоносителей (формула (6)).

Моделирование режимов работы теплообменных аппаратов показало, что не существует прямой зависимости между установочным значением параметра теплообменника и изменением температур и расходов первичного и вторичного теплоносителей, но можно определить диапазон изменений, в котором параметр теплообменника можно считать постоянным.

Результаты расчетов сведены в таблицу, где для каждой серии расчетов показаны диапазоны, когда параметр теплообменника остается постоянным $\Phi/\Phi_0 = 1$, отклоняется от установочного значения не более чем на 15 % – $\Phi/\Phi_0 \geq 0,85$ и при значительном отклонении параметра от установочного значения $\Phi/\Phi_0 < 0,85$, и соответствующие этим диапазонам условия.

4. Заключительные замечания. Значение, равное установочному, параметр теплообменника может принимать только в одной точке. Поэтому необходимо определить, когда при любых переменных режимах работы параметр не будет отклоняться от расчетного значения более чем на 15 %. Во всех сериях расчетов основным условием $\Phi \approx \Phi_0$ являлось соотношение $\delta t_l / \delta t_s \approx 1$ (см. Таблицу).

Условия изменения параметров теплообменников

Серия	$\Phi/\Phi_0 = 1$				$\Phi/\Phi_0 \geq 0,85$				$\Phi/\Phi_0 < 0,85$			
	$\frac{\Delta t}{\Delta t_c}$	$\frac{\delta t_l}{\delta t_s}$	$\frac{Q}{Q_c}$	$\frac{W_p}{W_h}$	$\frac{\Delta t}{\Delta t_c}$	$\frac{\delta t_l}{\delta t_s}$	$\frac{Q}{Q_c}$	$\frac{W_p}{W_h}$	$\frac{\Delta t}{\Delta t_c}$	$\frac{\delta t_l}{\delta t_s}$	$\frac{Q}{Q_c}$	$\frac{W_p}{W_h}$
I	1	1,02	0,97	1,54	0,93–1,34	1–1,25	0,3–5,1	0,29–22,76	–	–	–	–
II	0,32	1,09	0,12	1,21	0,04–5,95	1,09–1,5	0,05–2,5	0,31–5,39	–	–	–	–
III	5,9	1,09	2,5	1,54	1,51–2,45	1,02–3,09	0,66–1,38	0,22–1,09	>2,45	>3,09	<0,66	<0,22
IV	1,67	1,03	1,14	1,05	0,98–1	1–1,038	1–1,05	0,67–2,65	1–1,01	1,0–1,11	>1,05	>2,65
V	1	1,02	1,021	1,78	1,52–2,16	1,03–1,033	0,97–1,6	1,04	1,68–2,2	1–1,03	<0,97	1,04

В I серии расчетов, когда была постоянной температура первичного теплоносителя на входе t_{p1} , параметр Φ оставался почти постоянным при любом режиме работы теплообменника, однако, как показали серии расчетов II, III, V, чем больше Δt отличается от Δt_c , тем меньше будет диапазон со стабильным параметром Φ . В то же время, этот параметр может принимать значение, равное установочному и при значительном отклонении Δt от Δt_c , как в серии II, где диапазон $\Delta t / \Delta t_c = 0,04–5,95$ ($\Phi = \Phi_0$ при $\Delta t / \Delta t_c = 5,9$), а в V серии расчетов установочное значение Φ вообще не зависит от $\Delta t / \Delta t_c$.

В III серии расчетов $\Phi/\Phi_0 < 0,85$ при $\Delta t / \Delta t_c > 2,45$, но при большом отклонении большей разности температур от меньшей на концах теплообменника $\delta t_l / \delta t_s = 3,09$, поэтому необходимо, чтобы отношение $\delta t_l / \delta t_s$ для произвольного режима работы было менее 1,5, как в серии II.

Из сравнения серий I и IV видно, что отношения $\Delta t / \Delta t_c$, $\delta t_l / \delta t_s$, Q/Q_c , при которых $\Phi = \Phi_0$, приблизительно одинаковы и равны 1, однако, если в I серии параметр Φ как при уменьшении, так и при увеличении тепловой мощности в больших пределах не отклоняется от установочного значения более чем на 15 %, то в IV серии диапазон $\Phi/\Phi_0 \geq 0,85$ очень мал и практически соответствует установочной тепловой мощности теплообменника. Отсюда можно сделать вывод, что определяющим в данном случае является соотношение расходов первичного и вторичного теплоносителей $W_p / W_h = 0,67–2,65$.

Сравнение результатов расчета серий III и V показывает, что здесь при прочих равных условиях определяющее – отношение текущей тепловой мощности к установочной $Q/Q_c = 0,97–1,6$.

Таким образом, параметр теплообменника не будет отклоняться от установочного значения более чем на 15 %

при любом произвольном режиме работы при одновременном выполнении следующих условий:

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_c} = 0,04 - 5,95; \quad \frac{\delta t_l}{\delta t_s} = 1,09 - 1,5;$$

$$\frac{Q}{Q_c} = 0,97 - 1,6; \quad \frac{W_p}{W_h} = 0,67 - 2,65.$$

Как показало моделирование, на параметр теплообменника Φ могут влиять все величины, воздействующие на изменение коэффициента теплопередачи. Параметр Φ незначительно отклоняется от установочного значения, если и температурный перепад Δt , и расходы теплоносителей возрастают с увеличением тепловой мощности теплообменника Q . При этом расходы первичного и вторичного теплоносителей могут меняться почти неограниченно. Однако для реальных условий эксплуатации теплообменников часто характерен другой режим работы – увеличение температурного напора в теплообменнике при снижении его тепловой мощности, например, для теплообменников в тепловом пункте системы теплоснабжения. В этом случае указанный параметр может значительно отклоняться от установочного значения. Условием постоянства параметра теплообменника Φ можно считать $\Delta t = \delta t_l = \delta t_s$ и равенство расходов первичного и вторичного теплоносителей $W_p = W_h$. Однако это недостаточное условие, оно справедливо только в одной точке и некоторой ее окрестности. При постоянных расходах первичного и вторичного теплоносителей в переменном режиме параметр теплообменника будет постоянным по определению, а коэффициент теплопередачи теплообменника при изменении тепловой мощности и температурного напора будет меняться существенно. Это делает невозможным использование соотношений с постоянными параметрами даже для расчета отдельного теплообменника.

В современных системах теплоснабжения часто применяются группы взаимосвязанных теплообменников, с перераспределением тепловой мощности при переменных режимах работы, что позволяет экономить тепловую энергию. В системе, состоящей хотя бы из двух теплообменников, погрешность расчетов, связанная с применением постоянного параметра Φ , может оказаться еще более существенной.

Таким образом, необходимо дальнейшее исследование работы теплообменников при переменном режиме для разработки достаточно точных методов расчета их характеристик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шубин Е.П. Новая приближенная формула для средней логарифмической разности температур // Теплоэнергетика. 1957. № 2. С. 40–42.
2. Соколов Е.Я. Тепловые характеристики теплообменных аппаратов // Технология. 1958. № 5. С. 38–43.
3. Шубин Е.П. Новые приближенные формулы для теплового расчета теплообменников // Водоснабжение и санитарная техника. 1958. № 5. С. 1–5.

4. Шубин Е.П. Термические характеристики теплообменников // Водоснабжение и санитарная техника. 1962. № 6. С. 29–34.
5. Соколов Е.Я. Расчет переменного термического режима оборудования абонентских установок // Изв. вузов. Энергетика. 1963. № 2. С. 57–64.
6. Соколов Е.Я. О термических характеристиках теплообменников // Водоснабжение и санитарная техника. 1963. № 1. С. 20–24.
7. Шубин Е.П. Еще о термических характеристиках теплообменников // Водоснабжение и санитарная техника. 1963. № 1. С. 25–29.
8. Соколов Е.Я., Калинин Н.В. Проверка точности приближенного уравнения характеристики теплообменных аппаратов // Теплоэнергетика. 1964. № 2. С. 70–74.
9. Ротов П.В. Совершенствование систем централизованного теплоснабжения, подключенных к ТЭЦ, путем разработки энергоэффективных технологий обеспечения нагрузок отопления и горячего водоснабжения: Дис. ... д-ра техн. наук. Ульяновск, 2015. 410 с.
10. Окатов И.М., Щербаков М.С., Сеников В.В., Коновалов А.В. Влияние термической нагрузки на температуру сетевой воды после подогревателей горячего водоснабжения различных типов // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: XVIII Бенардосовские чтения: материалы междунар. науч.-техн. конф. Иваново, 2015. С. 190–194.
11. Белоногов Н.В., Пронин В.А. Расчет эффективности перекрестно-точных пластинчатых теплообменников // Вестн. междунар. акад. холода. 2004. № 4. С. 12–15.
12. Андреев С.Ю., Федоров И.П., Мельниченко С.В. Автоматизация расчетов сопротивления теплообменников в период эксплуатации // Энергосбережение. Энергоаудит. 2013. № 12. С. 18–26.
13. Хавин Г.Л. Термический и гидравлический расчет пластинчатых теплообменников с учетом загрязнений // Проблемы машиностроения. 2012. Т. 15, № 3–4. С. 61–67.
14. Самарин О.Д. Оценка температурной эффективности теплоизолизаторов с промежуточным теплоносителем по безразмерным параметрам // Изв. вузов. Строительство. 2009. № 2. С. 54–58.
15. Hesselgrave J.E. An approach to fouling allowances in the design of compact heat exchangers // Apl. Thermal Eng. 2002. Vol. 22. P. 755–762.
16. Male van P., Croon de M.H.J.M., Tiggelaar R.M., Berg van den A., Shouten J.G. Heat and mass transfer in a square microchannel with asymmetric heating // International journal of heat and mass transfer. 2004. Vol. 47. P. 87–99.
17. Vlachogiannis M., Bontozoglou V. Observations of solitary wave dynamics of film flows // J. Fluid Mech. 2001. Vol. 435. P. 191–215.
18. Рафальская Т.А. Методика расчета режимов двухступенчатой смешанной схемы подогревателей горячего водоснабжения с ограничением расхода // Изв. вузов. Строительство. 2002. № 3. С. 73–78.
19. Рафальская Т.А., Мансуров Р.Ш., Ефимов Д.И., Косова Е.Ю. Проблемы энергетической эффективности систем централизованного теплоснабжения // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 10–11. С. 32–48.
20. Соколов Е.Я. Термофикация и тепловые сети. М.: Изд-во МЭИ, 2001. 472 с.

Рафальская Татьяна Анатольевна, канд. техн. наук, доц.;
E-mail: rafalskaya.ta@yandex.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
Рудяк Валерий Яковлевич, д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail: valery.rudyak@mail.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 30.07.18

Rafalskaya Tatyana Anatolevna, PhD, Ass. Professor; E-mail: rafalskaya.ta@yandex.ru
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Rudyak Valery Yakovlevich, DSc, Professor; E-mail: valery.rudyak@mail.ru
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

ON THE APPLICABILITY OF THE RATIOS WITH CONSTANT PARAMETERS FOR CALCULATION OF VARIABLE MODES OF HEAT EXCHANGERS

Heat exchangers are an important component of any thermal systems. Installation characteristics allow to determinate the capacity of the heat exchanger in certain installation conditions, but under variable modes of operation the temperature of the heating medium at the inlet and outlet of the heat exchanger and their flows are unknown. Calculation of modes of operation of heat exchangers in conditions different from the installation, using accurate exponential formulas becomes impossible, due to the large number of independent variables. To solve this problem, the method of calculating heat exchangers based on dimensionless complexes using approximate formulas is used. By simulation method was determined the range of mutual changes in temperatures and flows of heating and heated mediums, in which it is possible to use approximate formulas based on the constant parameters of heat exchangers and the magnitude of possible error. The obtained data can be used to adjust the calculations, as well as to assess the feasibility of using approximate formulas.

K e y w o r d s: heat exchanger, heat transfer, parameters of heat exchanger, characteristics of heat exchanger, heat transfer coefficient.

REFERENCES

1. S h u b i n E.P. Novaya priblizhennaya formula dlya sredney logarifmicheskoy raznosti temperatur [New approximate formula for the average logarithmic temperature difference]. Teploenergetika [Thermal Engineering]. 1957. No. 2. Pp. 40–42. (in Russian)
2. S o k o l o v E.Ya. Teplovye kharakteristiki teploobmennykh apparatov [Thermal characteristics of heat exchangers]. Teploenergetika [Thermal Engineering]. 1958. No. 5. Pp. 38–43. (in Russian)
3. S h u b i n E.P. Novye priblizhennye formuly dlya teplovogo rascheta teploobmennikov [New approximate formulas for thermal calculation of heat exchangers]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary engineering]. 1958. No. 5. Pp. 1–5. (in Russian)
4. S h u b i n E.P. Teplovye kharakteristiki teploobmennikov [Heat characteristics of heat exchangers]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary engineering]. 1962. No. 6. Pp. 29–34. (in Russian)
5. S o k o l o v E.Ya. Raschet peremennogo teplovogo rezhima oborudovaniya abonentskikh ustyanovok [Calculation of the variable thermal regime of equipment of subscriber units]. Izvestiya vuzov. Energetika [News of Higher Educational Institutions. Power engineering]. 1963. No. 2. Pp. 57–64. (in Russian)
6. S o k o l o v E.Ya. O teplovyykh kharakteristikakh teploobmennikov [About thermal characteristics of heat exchangers]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary engineering]. 1963. No. 1. Pp. 20–24. (in Russian)

7. Shubin E.P. Eshche o teplovykh kharakteristikakh teploobmennikov [More on the thermal characteristics of heat exchangers]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary engineering]. 1963. No. 1. Pp. 25–29. (in Russian)
8. Sokolov E.Ya., Kalinin N.V. Proverka tochnosti priblizhennogo uravneniya kharakteristiki teploobmennykh apparatov [Checking the accuracy of the approximate equation of the characteristics of heat exchangers]. Teploenergetika [Thermal Engineering]. 1964. No. 2. Pp. 70–74. (in Russian)
9. Rotov P.V. Sovershenstvovanie sistem tsentralizovannogo teplosnabzheniya, podklyuchennykh k TETS, putem razrabotki energoeffektivnykh tekhnologiy obespecheniya nagruzok otopleniya i goryachego vodosnabzheniya [Improvement of centralized heat supply systems connected to CHP plants through the development of energy efficient technologies for ensuring loads of heating and hot water supply]. Ulyanovsk, 2015. 410 p. (in Russian)
10. Okatov I.M., Scherbakov M.S., Sennikov V.V., Konovalov A.V. Vliyanie teplovoy nagruzki na temperaturu setevoy vody posle podogrevateley goryachego vodosnabzheniya razlichnykh tipov [The effect of heat load on the temperature of the supply water after hot water heaters of various types]. Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii: XVIII Benardosovskie chteniya: materialy mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii [State and prospects for the development of electrical and heat technology. XVIII Benardosov readings: materials of the international scientific and technical conference]. Ivanovo, 2015. Pp. 190–194. (in Russian)
11. Belonogov N.V., Pronin V.A. Raschet effektivnosti perekrestno-tochnykh plastinchatykh teploobmennikov [Calculation of the efficiency of cross-precision plate heat exchangers]. Vestnik mezhdunarodnoy akademii kholoda [Bulletin of the International Academy of Cold]. 2004. No. 4. Pp. 12–15. (in Russian)
12. Andreyev S.Yu., Fedorov I.P., Mel'nicenko S.V. Avtomatizatsiya raschetov sопротивления теплобменников в период эксплуатации [Automation of calculations of the resistance of heat exchangers in the period of operation]. Energosberezenie. Energetika. Energoaudit [Energy Saving. Energy. Energy Audit]. 2013. No. 12. Pp. 18–26. (in Russian)
13. Khavin G.L. Teplovoy i gidravlicheskiy raschet plastinchatykh teploobmennikov s uchetom zagryazneniy [Thermal and hydraulic calculation of plate heat exchangers taking into account pollution]. Problemy mashinostroeniya [Problems of Mechanical Engineering]. 2012. Vol. 15. No. 3-4. Pp. 61–67. (in Russian)
14. Samarin O.D. Otsenka temperaturnoy effektivnosti teploutilizatorov s promezhutochnym teplonositelem po bezrazmernym parametram [The estimation of temperature efficiency of heat regenerators with intermediate heat carrier by dimensionless parameters]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2009. No. 2. Pp. 54–58. (in Russian)
15. Hesselgrave J.E. An approach to fouling allowances in the design of compact heat exchangers. Apl. Thermal Eng. 2002. Vol. 22. Pp. 755–762.
16. Male van P., Croon de M.H.J.M., Tiggelaar R.M., Berg van den A., Shouten J.G. Heat and mass transfer in a square microchannel with asymmetric heating. International journal of heat and mass transfer. 2004. Vol. 47. Pp. 87–99.
17. Vlachogiannis M., Bontozoglou V. Observations of solitary wave dynamics of film flows. J. Fluid Mech. 2001. Vol. 435. Pp. 191–215.
18. Raftalskaya T.A. Metodika rascheta rezhimov dvukhstupenchatoy smeshannoy skhemy podogrevateley goryachego vodosnabzheniya s ograniceniem raskhoda [Method of calculating the modes of a two-stage mixed scheme of hot water heaters

- with flow restriction]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2002. No. 3. Pp. 73–78. (in Russian)
19. R a f a l s k a y a T.A., M a n s u r o v R.Sh., E f i m o v D.I., K o s o v a E.Yu. Problemy energeticheskoy effektivnosti sistem tsentralizovannogo teplosnabzheniya [Problems of power efficiency of systems of the centralized heat supply]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 10–11. Pp. 32–48. (in Russian)
20. S o k o l o v Ye.Ya. Teplofikatsiya i teplovye seti [Heating and heat networks]. Moscow, 2001. 472 p. (in Russian)
-

УСТРОЙСТВО ИНДУКЦИОННОГО ПРОГРЕВА БЕТОНИРУЕМЫХ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Устройство индукционного прогрева бетонируемых железобетонных конструкций включает в себя различное расположение проводников в диэлектрической опалубке со стороны, не соприкасающейся с бетоном, и их подключение к источнику электрической энергии от частотного преобразователя. Прогрев и поддержание заданной температуры в процессе набора прочности бетоном состоит в том, что нагревательным элементом является плоская индукционная катушка квадратной формы, являющаяся единым целым с конструкцией опалубочных щитов, использующая переменные токи повышенной частоты.

Преимущества предложения

Изобретение может быть использовано при возведении стен, плит, колонн и конструкций монолитных зданий и сооружений, требующих тепловой обработки. Техническим результатом применения устройства является повышение качества монолитных железобетонных конструкций, снижение себестоимости при производстве работ в зимнее время.

На устройство получен патент.

Разработчики:

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

E-mail: agdtmm48@mail.ru

**Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)**

Дмитриев Антон Андреевич, инж.-проектировщик

Техкомпания Huawei

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

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
«СТРОИТЕЛЬСТВО»

Издаётся с марта 1958 г.

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

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

ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ ЖУРНАЛА:

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

Принимается подписка
на 2-е полугодие по каталогу «Роспечать» 2018 г.

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

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

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

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

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

Внимание!

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

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

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**

№ 8 (716) 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 30.08.18. Формат 70×108 $\frac{1}{16}$
Усл. печ. л. 9,45+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 3959

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