

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РФ

МЕЖДУНАРОДНАЯ ОБЩЕСТВЕННАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ СОДЕЙСТВИЯ РАЗВИТИЮ
СТРОИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 5 (713)

Май 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., МАДТУ (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. Костиц, д-р техн. наук, проф. (заместитель главного редактора), НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
Г.Б. Лебедев, канд. техн. наук, доц. (заместитель главного редактора), НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
П. Либланг, д-р, проф., Высшая техническая школа, Университет прикладных наук, Кёльн, Германия
Л.С. Ляхович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ТГАСУ, Томск
В.М. Митасов, д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
В.И. Морозов, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург
Ж.С. Нуужинов, д-р техн. наук, проф., КазМИРР, Караганда, Казахстан
Ю.П. Панибратов, акад. РААСН, д-р экон. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург
А.И. Полищук, д-р техн. наук, проф., КубГАУ, Краснодар
Г.И. Пустоветов, чл.-кор. РААСН, д-р архитектуры, проф., НГУАДИ, Новосибирск
Н.А. Сапрыкина, поч. чл. РААСН, д-р архитектуры, проф., МАРХИ, Москва
В.Г. Себешев, поч. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф. (главный редактор), НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
Ю.Л. Сколубович, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
И.С. Соболь, д-р техн. наук, проф., ННГАСУ, Нижний Новгород
Ю.А. Феофанов, д-р техн. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург
Й.В. Ху, PhD, проф., Национальный университет г. Инчхон, Республика Корея
Н.А. Цветков, д-р техн. наук, проф., ТГАСУ, Томск
Е.М. Чернышов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ВГТУ, Воронеж
В.Р. Чупин, д-р техн. наук, проф., ИНИТУ, Иркутск
Е.Ч. Шин, PhD, проф., Национальный университет г. Инчхон, Республика Корея

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ СООРУЖЕНИЙ

Мальцев В.В. Влияние плотности армирования на деформированное состояние в балках с заранее организованными трещинами	5
--	---

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ

Жилкин В.А. Исследование напряженно-деформированного состояния растягиваемой пластины из древесины с круговым отверстием с упругим включением	17
---	----

Лисицкий И.И., Жаданов В.И., Руднев И.В., Украинченко Д.А. Способы повышения несущей способности соединений деревянных конструкций на стальных вклеенных пластинах	31
--	----

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Артамонова О.В., Чернышов Е.М. К проблеме концептуальных моделей управления эволюционным маршрутом формирования наномодифицированных систем твердения в структуре строительных композитов	44
---	----

Шеховцова С.Ю., Высоцкая М.А., Королев Е.В. Критериальная оценка термодеструктивных процессов в асфальтобетоне на основе окисленных и остаточных битумов	58
--	----

Сусоева И.В. Физико-механические показатели теплоизоляционных материалов из отходов растительного сырья	71
---	----

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

Халтурина Т.И., Войтов Е.Л., Третьяков С.Г., Чурбакова О.В. Оптимизация процесса кондиционирования смешанного осадка маслозмульсионных и кислотно-щелочных сточных вод	80
--	----

Рафальская Т.А., Рохлецова Т.Л., Тюсов С.М. Центральное регулирование без верхней срезки: возможности и перспективы	91
---	----

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Воробьев В.С., Синицына А.С., Каталымова К.В., Запашникова Н.П. Имитационное моделирование в структуре создания БИМ-технологий строительных проектов	105
--	-----

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE
OF RUSSIAN FEDERATION

INTERNATIONAL PUBLIC ORGANIZATION
“ASSOCIATION OF EDUCATIONAL
CIVIL ENGINEERING INSTITUTIONS”

**NEWS OF HIGHER EDUCATIONAL
INSTITUTIONS**

CONSTRUCTION

No. 5 (713)

May 2018

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

EDITORIAL BOARD

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

Responsible secretary N.V. Bitkina

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

CONTENTS

THEORY OF STRUCTURES

Mal'tsev V.V. Influence of the reinforcement density on the deformed state in beams with the preformed cracks	5
---	---

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND STRUCTURES. BASES AND FOUNDATIONS

Zhilkin V.A. Investigation of stress-deformed status of plate from wood with circular hole with elastic nucleus in msc patran-nastran	17
Lisitskiy I.I., Zhadanov V.I., Rudnev I.V., Ukrainianchenko D.A. Ways of increase of the bearing capacity of wooden designs' connections on steel pasted plates	31

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

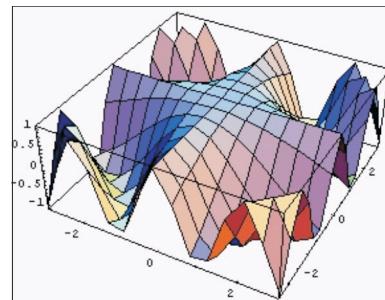
Artamonova O.V., Chernyshov E.M. To the problem of conceptual models of management of the evolutionary route of formation of nanomodified solid systems in the structure of construction composites	44
Shekhovtsova S.Yu., Vysotskaya M.A., Korolev E.V. Criterial estimation of thermal destructive processes in asphalt concrete on the basis of oxidized and residual bitumen	58
Susoeva I.V. Physicomechanical indicators heat-insulating materials from waste vegetable raw materials	71

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

Khaturina T.I., Voytov E.L., Tret'yakov S.G., Churbakova O.V. Optimization of the conditioning process of mixed oil-emulsion sediment and acid-alkali wastewater	80
Rafalskaya T.A., Rokhletsova T.L., Tyusov S.M. Central regulation without upper cut: capabilities and prospects	91

SECTION OF SCIENTIFIC METHODOLOGY

Vorob'ev V.S., Sinitsyna A.S., Katalymova K.V., Zapashchikova N.P. Mitation modeling in the structure of creation of BIM technologies of construction projects	105
--	-----



ТЕОРИЯ СООРУЖЕНИЙ

УДК 624.012.45

В.В. МАЛЬЦЕВ

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ АРМИРОВАНИЯ НА ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ В БАЛКАХ С ЗАРАНЕЕ ОРГАНИЗОВАННЫМИ ТРЕЩИНАМИ*

С помощью численного моделирования в программном комплексе (ПК) ANSYS исследовано влияние плотности армирования на деформированное состояние балок с одной, тремя и пятью заранее организованными трещинами. Балки выполнены из фенолформальдегидной смолы «Хромвинил V-276», армируемой слоем стеклопластика «АГ-4С». Для задания различных плотностей армирования $\mu = 0,1; 0,5; 1; 2; 3\%$ варьируется высота армирующего слоя. При моделировании балок с заранее организованными трещинами в ПК ANSYS применяется апробированный ранее оригинальный способ моделирования трещины. Получены распределения продольных, по-перечных и сдвиговых деформаций в окрестности трещины. Определено сечение по высоте балки, в котором продольные деформации практически не зависят от плотности армирования. Выявлено, что длина зоны краевого эффекта не зависит от количества организованных трещин в балке. Предложена методика оценки зоны краевого эффекта «сверху» и «снизу» по распределениям сдвиговых деформаций в продольном сечении балок.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, зона краевого эффекта, заранее организованная трещина, плотность армирования, численное моделирование, ANSYS.

1. Введение. Данная работа является непосредственным продолжением статьи [1], в которой исследовалось напряженно-деформированное состояние в балках с заранее организованными трещинами с высокой плотностью армирования – 5 %. Экспериментально полученные распределения нормальных напряжений, а также длина зоны краевого эффекта были сопоставлены с результатами численного моделирования в ПК ANSYS. В настоящей работе с помощью численного моделирования исследовалось влияние плотности армирования на деформированное состояние в балках с заранее организованными трещинами.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-31-00103, 2018 г.).

2. Численный эксперимент. Существуют исследования, посвященные рациональному расположению заранее организованных трещин в железобетонных балках. В работах [2–5] трещины располагаются в зоне максимального изгибающего момента; в работах [6, 7] выполнено расположение трещин вне зоны максимального изгибающего момента. В данной работе исследование напряженного состояния изгибающего армированного элемента проведено в условиях чистого изгиба на трех балках (образцах) с заранее организованными трещинами высотой 5 мм (рис. 1): образец № 1 – одна трещина (черная линия); образец № 2 – три трещины (одна черная и две синие линии); образец № 3 – пять трещин (одна черная, две синие и две красные линии).

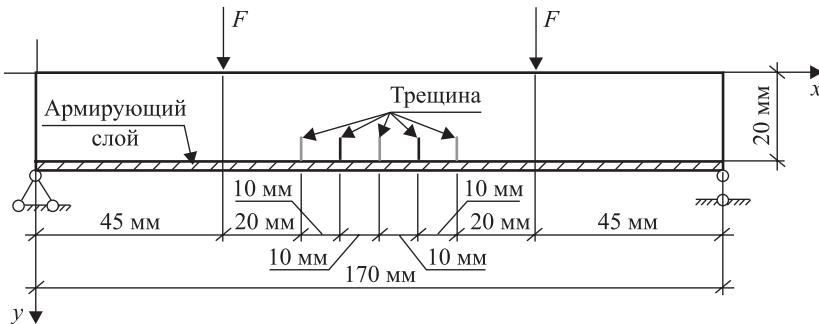


Рис. 1. Принципиальная схема испытания образцов

Расстояние между трещинами 10 мм для образца с пятью трещинами и 20 мм для образца с тремя трещинами выбрано на основании фундаментальных работ [7–9], согласно которым расстояние между первичными и вторичными стохастическими трещинами обычно находится в интервале от половины высоты сечения до полной высоты сечения изгибающего элемента.

Ширина раскрытия заранее организованных трещин 0,2 мм, толщина образцов – 6 мм. Защитный слой армирующего элемента не предусмотрен. При численном моделировании всех образцов используются следующие коэффициенты армирования $\mu = 0,1; 0,5; 1; 2; 3\%$. Минимальный коэффициент армирования $\mu = 0,1\%$ выбран в соответствии с рекомендациями СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции». Сосредоточенная нагрузка равна $F = 75$ Н.

Численное моделирование выполнено в соответствии с предложенной в работе [1] методикой в трехмерной постановке, основанной на применении жесткого контакта типа bonded в сечении над трещиной и между армирующим элементом [10].

В качестве материала для образцов были выбраны используемые ранее в экспериментальном исследовании [1] связующий материал – фенолформальдегидная смола «Хромвинил В-276» и стеклопластик «АГ-4С» в качестве армирующего слоя. Модуль упругости смолы $E_{cm} = 3200$ МПа, армирующего слоя – $E_{apm} = 38\,000$ МПа.

В табл. 1 приведены координаты по оси x (см. рис. 1) характерных по-перечных сечений для трех образцов с заранее организованными трещинами.

Сечения 1-1, 3-3 и 4-4 проходят через трещины. Сечение 2-2 находится на расстоянии 10 мм от самой крайней трещины (рис. 1), что позволяет

Таблица 1. Координаты поперечных сечений, мм

Образец	Сечение			
	1-1	2-2	3-3	4-4
№ 1 с 1 трещиной	85	75	—	—
№ 2 с 3 трещинами	85	55	65	—
№ 3 с 5 трещинами	85	55	65	75

исключить влияние сосредоточенной нагрузки F на напряженно-деформированное состояние для образцов с тремя и пятью трещинами. Это расстояние сопоставимо с длиной зоны краевого эффекта, определенной в работе [1].

3. Результаты численного эксперимента. Далее приведены результаты расчетов численного моделирования в ПК ANSYS балок с заранее организованными трещинами с разными плотностями армирования.

На рис. 2 изображены распределения продольных ε_{xx} , поперечных ε_{yy} и сдвиговых ε_{xy} деформаций по высоте сечения 1-1 для балки с одной трещиной. Для балки с тремя и пятью трещинами распределения деформаций по высоте сечения балки имеют аналогичный характер. Горизонтальная линия «Трещина», обозначенная черными точками на рис. 2, является координатой вершины трещины по оси y .

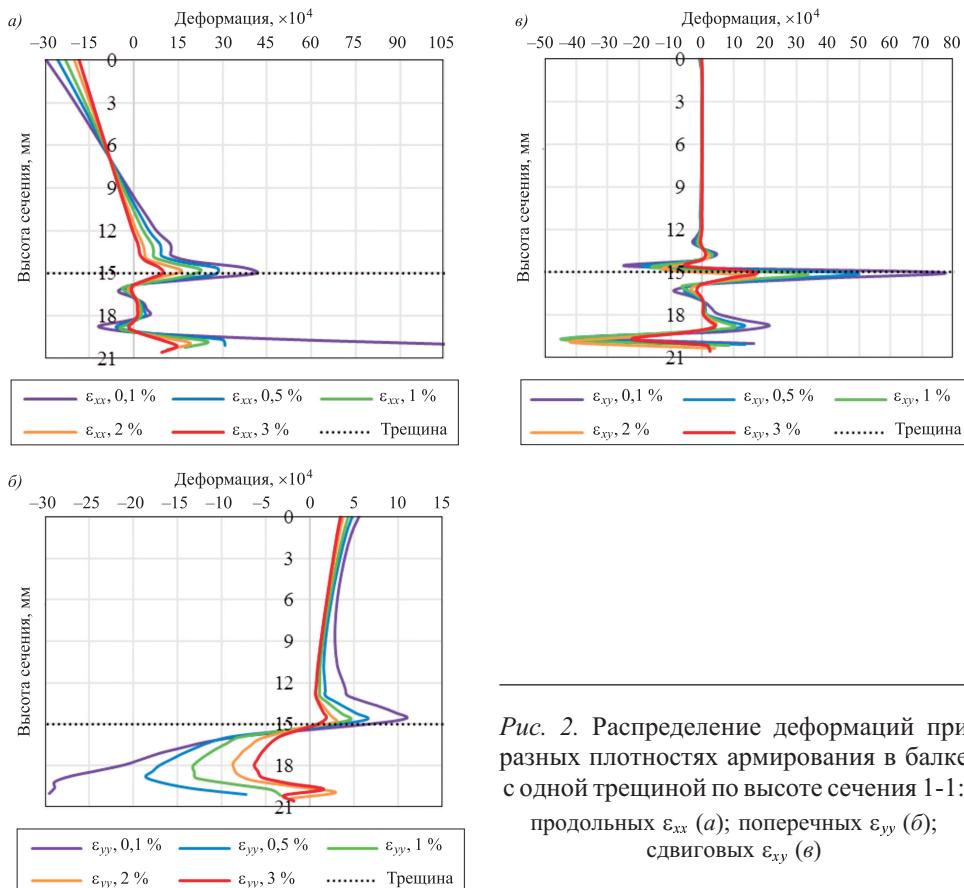


Рис. 2. Распределение деформаций при разных плотностях армирования в балке с одной трещиной по высоте сечения 1-1:
продольных ε_{xx} (а); поперечных ε_{yy} (б);
сдвиговых ε_{xy} (в)

Наличие точки пересечения линий на графике (рис. 2, а) распределения продольных деформаций ε_{xx} по высоте сечения для разных плотностей армирования позволяет выдвинуть гипотезу о существовании сечения в продольном направлении образца, в котором распределения продольных деформаций не зависят от плотности армирования. Координаты точек пересечения эпюор продольных деформаций ε_{xx} вдоль оси y для образцов: с одной и тремя трещинами $y = 6,9$ мм; для образца с пятью трещинами $y = 6,4$ мм. Для под-

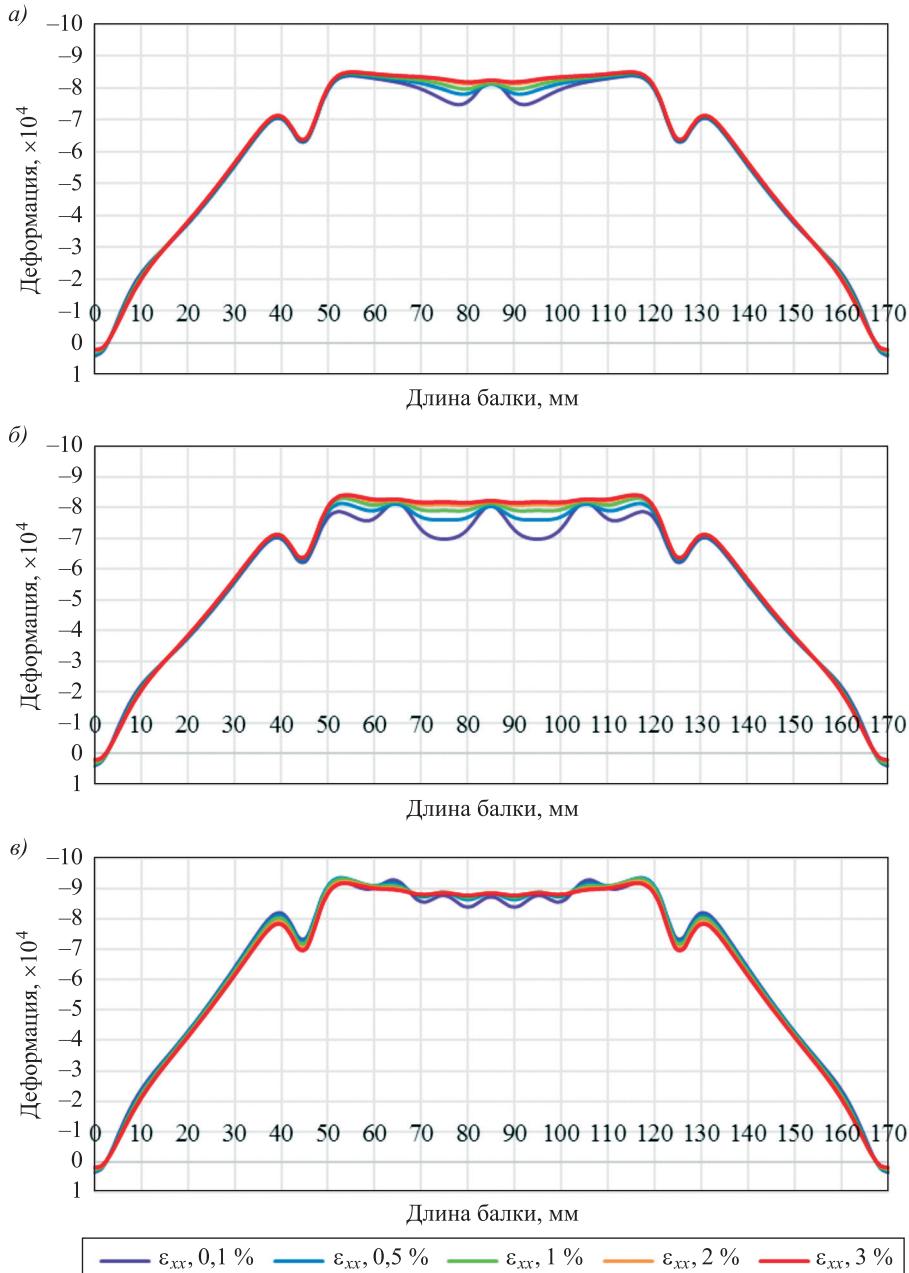


Рис. 3. Распределение продольных деформаций ε_{xx} в продольном сечении образца: с одной трещиной при $y = 6,9$ мм (а); с тремя трещинами при $y = 6,9$ мм (б); с пятью трещинами при $y = 6,4$ мм (в)

тврждения данной гипотезы построены распределения продольных деформаций ε_{xx} вдоль длины балки (рис. 3) в сечениях по указанным выше координатам.

Результаты численного моделирования подтверждают выдвинутую гипотезу – продольные деформации ε_{xx} при разных плотностях армирования практически совпадают на всех участках по длине балки, кроме области в окрестности трещин (рис. 3). На данном участке зафиксировано расхождение деформаций на расстоянии, соответствующем высоте поперечного сечения балки h для образцов с одной и тремя трещинами и $1,25 h$ для образца с пятью трещинами слева и справа от крайней трещины (см. рис. 1). Следует отметить, что полученные результаты также подтверждают предположение В.М. Митасова [2, 6] о том, что заранее организованную трещину можно рассматривать как регулятор напряженно-деформированного состояния в армированной балке.

Результаты расчетов для балок с заранее организованными трещинами, полученные с помощью численного моделирования в ПК ANSYS (табл. 2), продемонстрировали возможность сопоставления расчетного деформиро-

Таблица 2. Результаты численного моделирования

Номер образца	Параметр	Плотность армирования $\mu, \%$				
		0,1	0,5	1	2	3
1	2	3	4	5	6	7
<i>Сечение 1-1</i>						
1	Высота сжатой зоны $X_R, \text{мм}$	9,63	10,12	10,64	11,57	12,28
2		9,55	10,06	10,61	11,56	12,29
3		8,89	9,62	10,33	11,49	12,34
1	Деформация ε_{xx} при $y = 0 \text{ мм}, \times 10^4$	-29,69	-25,70	-23,10	-20,17	-18,47
2		-29,86	-25,81	-23,17	-20,20	-18,48
3		-32,11	-27,06	-23,85	-20,43	-18,56
1	Деформация ε_{yy} при $y = 0 \text{ мм}, \times 10^4$	5,53	4,76	4,26	3,69	3,37
2		5,68	4,86	4,33	3,74	3,40
3		6,08	5,09	4,45	3,78	3,41
1	Деформация ε_{xy} при $y = 0 \text{ мм}, \times 10^4$	-0,87	-0,61	-0,46	-0,29	-0,20
2		-1,40	-0,99	-0,73	-0,47	-0,32
3		-1,37	-0,98	-0,72	-0,45	-0,31
<i>Сечение 2-2</i>						
1	Высота сжатой зоны $X_R, \text{мм}$	9,64	10,30	10,92	11,94	12,76
2		9,68	10,34	10,96	11,96	12,77
3		9,65	10,31	10,94	11,96	12,78
1	Деформация ε_{xx} при $y = 0 \text{ мм}, \times 10^4$	-27,11	-24,46	-22,38	-19,83	-18,27
2		-26,59	-23,92	-21,84	-19,30	-17,75
3		-26,61	-23,96	-21,86	-19,30	-17,74

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
1	Деформация ε_{xx} при $y = 20$ мм, $\times 10^4$	21,72	19,26	16,43	12,56	10,17
2		21,92	19,41	16,54	12,62	10,20
3		21,86	19,36	16,52	12,62	10,20
1	Деформация ε_{yy} при $y = 0$ мм, $\times 10^4$	3,29	3,57	4,03	4,40	4,88
2		3,19	3,47	3,93	4,31	4,79
3		3,19	3,47	3,94	4,31	4,79
1	Деформация ε_{yy} при $y = 20$ мм, $\times 10^4$	-3,42	-2,63	-2,13	-1,67	-1,47
2		-3,46	-2,66	-2,15	-1,70	-1,49
3		-3,45	-2,66	-2,15	-1,70	-1,49

Сечение 3-3

2	Высота сжатой зоны X_R , мм	9,61	10,11	10,65	11,60	12,32
3		9,16	9,89	10,51	11,57	12,35
2	Деформация ε_{xx} при $y = 0$ мм, $\times 10^4$	-29,76	-25,70	-23,06	-20,09	-18,37
3		-30,87	-26,32	-23,40	-20,21	-18,42
2	Деформация ε_{yy} при $y = 0$ мм, $\times 10^4$	5,66	4,83	4,31	3,72	3,38
3		5,93	4,94	4,45	3,73	3,38
2	Деформация ε_{xy} при $y = 0$ мм, $\times 10^4$	-1,40	-0,98	-0,73	-0,46	-0,32
3		-1,39	-0,98	-0,72	-0,45	-0,31

Сечение 4-4

3	Высота сжатой зоны X_R , мм	8,92	9,65	10,34	11,49	12,34
3	Деформация ε_{xx} при $y = 0$ мм, $\times 10^4$	-32,07	-27,01	-23,82	-20,42	-18,55
3	Деформация ε_{yy} при $y = 0$ мм, $\times 10^4$	6,08	5,08	4,45	3,77	3,41
3	Деформация ε_{xy} при $y = 0$ мм, $\times 10^4$	-1,37	-0,98	-0,72	-0,46	-0,31

ванного состояния между образцами с разным количеством заранее организованных трещин. В сечении 1-1 (сечение с центральной трещиной) высота сжатой зоны X_R и деформации в продольном ε_{xx} и поперечном ε_{yy} направлении совпадают с точностью от 0,5 % при $\mu = 3$ % до 10 % при $\mu = 0,1$ % для разных образцов. Максимальная погрешность наблюдается при сопоставлении деформаций сдвига. Сдвиговые деформации в образце с одной трещиной примерно на 60 % ниже, чем в образцах с тремя и пятью трещинами. В сечении 2-2 результаты деформированного состояния совпадают с точностью 0,1÷2 %. В сечении 3-3 разница между высотой сжатой зоны X_R , а также деформациями в продольном и поперечном направлении не превышает 0,3 % при $\mu = 3$ % и 4,8 % при $\mu = 0,1$ % для образцов с тремя и пятью трещинами.

Сдвиговые деформации отличаются на 0,7 % при $\mu = 0,1\%$ и на 3,2 % при $\mu = 3\%$.

По результатам расчетов выявлено, что в образце с тремя трещинами распределения деформаций и высота сжатой зоны в сечениях с трещинами совпадают с точностью до 2 %, а в образце с пятью трещинами – до 4 %.

Максимальные деформации сдвига ε_{xy} (см. рис. 2, в) в сечении с трещиной зафиксированы в окрестности вершины трещины ($y \approx 15$ мм) и области сопряжения смолы с армирующим слоем ($y \approx 20$ мм). На рис. 4 приведено распределение сдвиговых деформаций в указанных продольных сечениях. Необходимо отметить, что непосредственно в вершине трещины и в месте сопряжения смолы с армирующим слоем касательные напряжения равны нулю. В районе опор касательные напряжения при $y = 20$ мм стремятся к бесконечности вследствие того, что опорные реакции являются сосредоточенными.

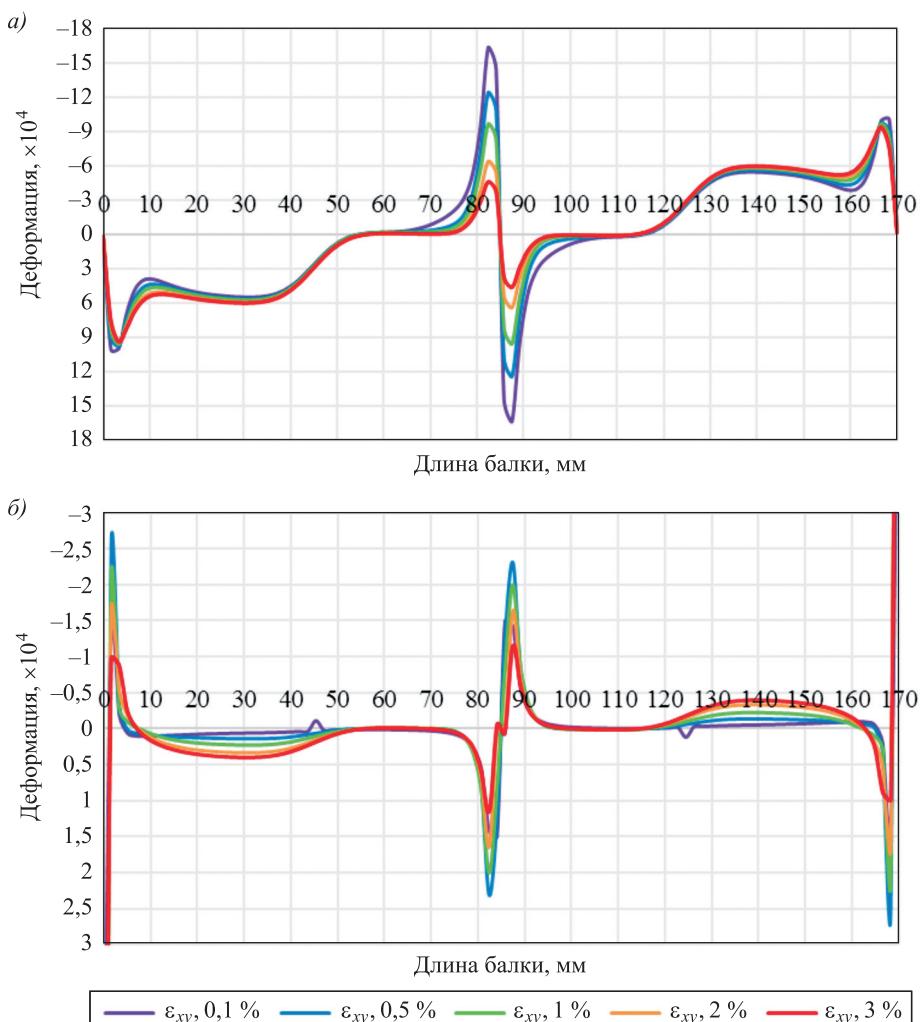


Рис. 4. Распределение сдвиговых ε_{xy} деформаций для балки с одной трещиной в продольном сечении: в уровне вершины трещины (а); в уровне сопряжения смолы с армирующим слоем (б)

По приведенным на рис. 3 распределениям может быть произведена оценка зоны краевого эффекта – характерной длины балки в окрестности трещины, на которой касательные напряжения являются существенными. В соответствии с работой [1] для балки с одной трещиной зона краевого эффекта слева и справа от трещины не суммируется, а считается одинаковой в силу симметрии. Длина зоны краевого эффекта в уровне вершины трещины находится в интервале от 10 мм для $\mu = 3\%$ до 15 мм для $\mu = 0,1\%$ (рис. 4, *a*), а в уровне сопряжения смолы с армирующим элементом соответствует 10 мм, при этом сдвиговые деформации для различных плотностей армирования практически совпадают (рис. 4, *б*).

По аналогии построены распределения сдвиговых деформаций ε_{xy} для балок с тремя и с пятью заранее организованными трещинами (рис. 5, 6). Следует отметить, что сдвиговые деформации в балках с тремя и пятью трещинами превышают примерно в 2 раза деформации в балке с одной трещиной

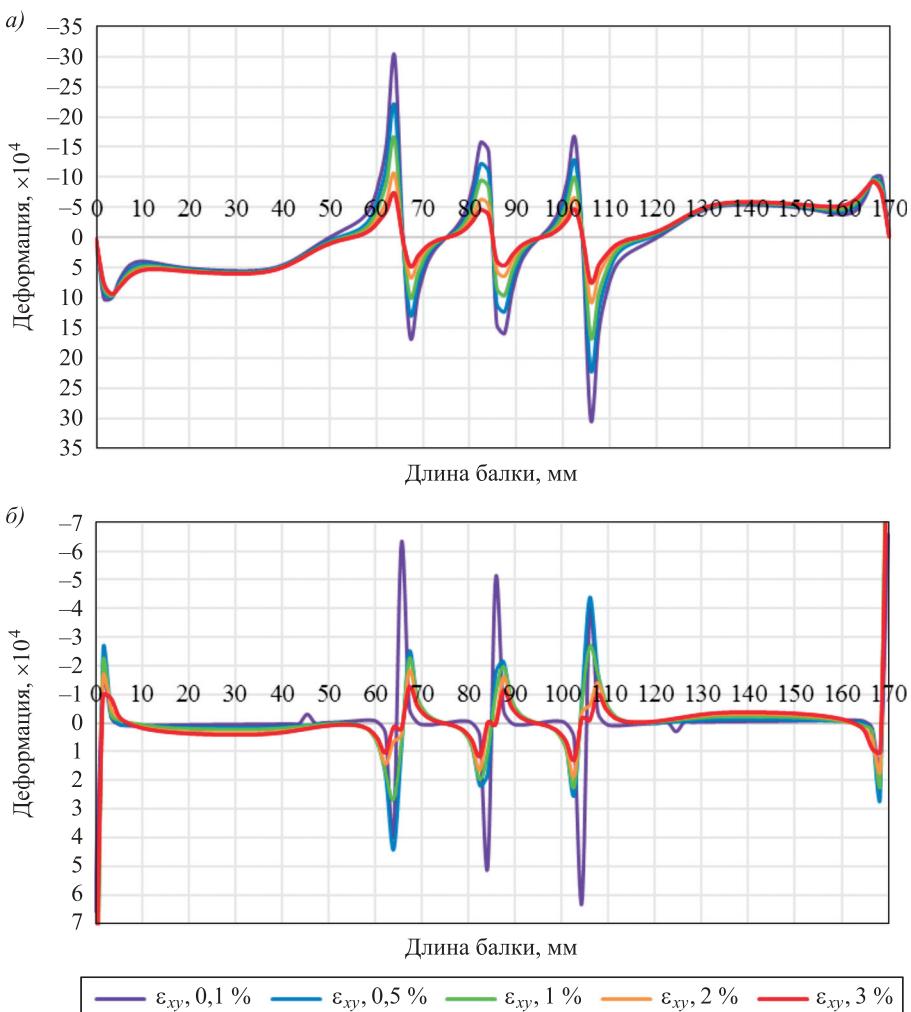


Рис. 5. Распределение сдвиговых ε_{xy} деформаций для балки с тремя трещинами в продольном сечении: в уровне вершины трещины (*а*); в уровне сопряжения смолы с армирующим слоем (*б*)

(см. рис. 4). В образце с тремя и пятью трещинами при $\mu = 0,1\%$ зафиксировано изменение знака сдвиговых деформаций ε_{xy} на отметке, соответствующей $y = 20$ мм, на расстоянии 4 мм от трещины. Данное изменение вызвано малой плотностью армирования (рис. 5, б и 6, б).

Длина зоны краевого эффекта на отметке вершины трещины (рис. 5, а и 6, а) находится в интервале от 10 мм для $\mu = 3\%$ до 15 мм для $\mu = 0,1\%$, а на отметке границы раздела тела балки и армирующего элемента (рис. 5, б и 6, б) соответствует 10 мм.

Таким образом, можно сделать вывод, что количество заранее организованных трещин в балке не оказывает влияния на длину зоны краевого эффекта. Зону краевого эффекта, определенную на отметке вершины трещины, можно считать оценкой «сверху» (максимально возможным значением), а определенную в уровне сопряжения смолы с армирующим слоем – оценкой «снизу» (минимально возможным значением).

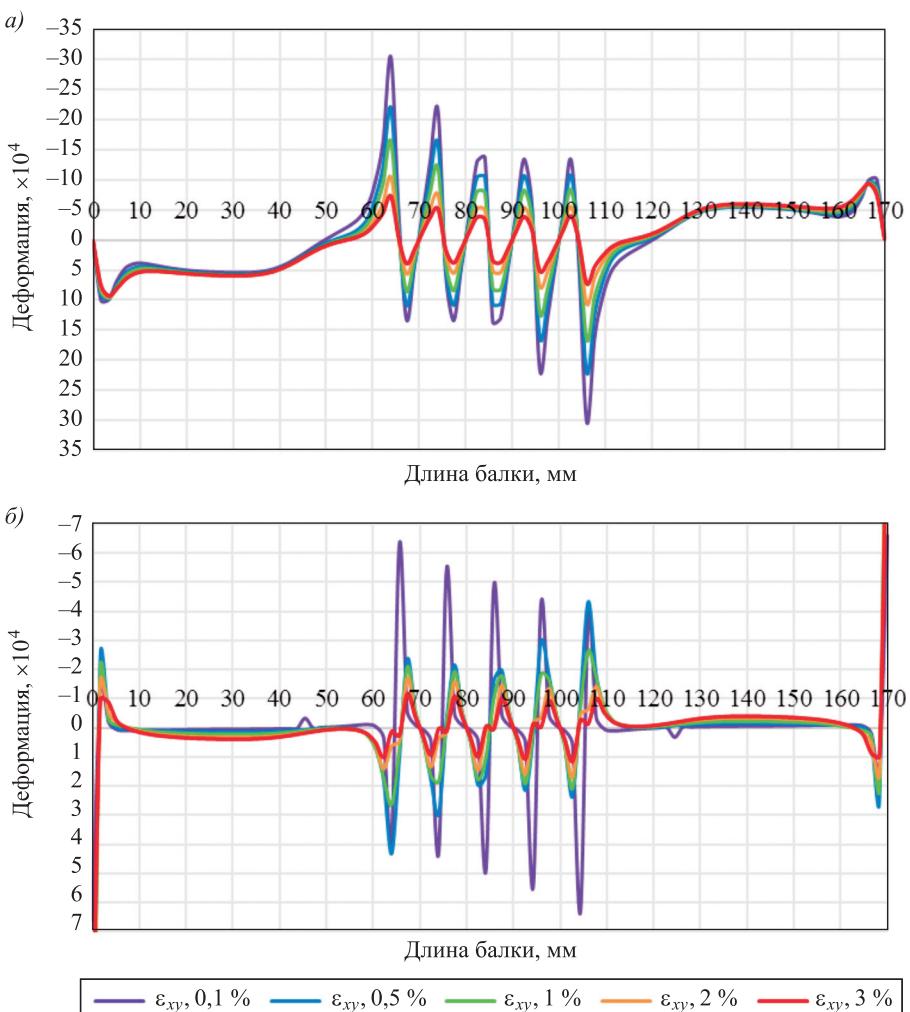


Рис. 6. Распределение сдвиговых ε_{xy} деформаций для балки с пятью трещинами в продольном сечении: в уровне вершины трещины (а); в уровне сопряжения смолы с армирующим слоем (б)

4. Заключение. Проведенный анализ результатов численного моделирования балок с заранее организованными трещинами позволяет сделать следующие выводы.

1. Предложена и подтверждена с помощью численного моделирования гипотеза о существовании сечения в продольном направлении образца, в котором распределения продольных деформаций не зависят от плотности армирования. Определены координаты сечений по высоте балки, в которых продольные деформации при разных плотностях армирования практически совпадают на всех участках по длине балки, кроме области в окрестности трещин. Несовпадение наблюдается слева и справа от крайней трещины на расстоянии, соответствующем высоте поперечного сечения балки h для образцов с одной и тремя трещинами и $1,25 h$ для образца с пятью трещинами.

2. Определены координаты сечений по высоте балки, в которых продольные деформации при разных плотностях армирования практически одинаковы на всех участках по длине балки, кроме области в окрестности трещин.

3. Предложена методика определения зоны краевого эффекта «сверху» и «снизу» по распределениям сдвиговых деформаций в продольном сечении балки в уровне вершины трещины и зоны сопряжения смолы с армирующим слоем.

4. Установлено, что на длину зоны краевого эффекта оказывает влияние плотность армирования балки, но не оказывает влияние количество организованных трещин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адищев В.В., Мальцев В.В., Шульга В.К. Исследование напряженно-деформированного состояния в балках с заранее организованными трещинами // Изв. вузов. Строительство. 2018. № 3. С. 95–108.
2. Митасов В.М., Логунова М.А. Конструкции с заранее организованными трещинами // Вестн. ТГАСУ. 2015. № 1. С. 115–121.
3. Митасов В.М., Логунова М.А., Шатохина М.В. Железобетонные балки с заранее организованными трещинами под воздействием длительной нагрузки // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 10. С. 5–10.
4. Логунова М.А., Пешков А.С. Экспериментальные исследования бетонных балок без организованных трещин и с заранее организованными трещинами // Изв. вузов. Строительство. 2011. № 1. С. 116–120.
5. Михайлова Н.С. Экспериментальные исследования железобетонных балок без трещин и с заранее намеченной трещиной // Изв. вузов. Строительство. 2007. № 4. С. 110–113.
6. Митасов В.М., Логунова М.А., Стациенко Н.В. Влияние положения заранее организованных трещин на деформирование железобетонных элементов // Вестн. ТГАСУ. 2016. № 2. С. 139–147.
7. Митасов В.М., Логунова М.А., Стациenko Н.В. Новые подходы к решению задач деформирования железобетонных конструкций с трещинами // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 1. С. 77–83.
8. Мурашев В.И. Трещиноустойчивость, жесткость и прочность железобетона. М.: Машстройиздат, 1950. 268 с.
9. Ахвердов И.Н., Смолский А.Е., Сокчеляс В.В. Моделирование напряженного состояния бетона и железобетона. Минск: Наука и техника, 1973. 231 с.
10. Басов К.А. ANSYS: Справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.

Мальцев Виктор Васильевич, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 04.04.18

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

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

INFLUENCE OF THE REINFORCEMENT DENSITY ON THE DEFORMED STATE IN BEAMS WITH THE PREFORMED CRACKS

With the help of numerical simulation in ANSYS PC studied the effect of density on the reinforcement beams in the strained state of the one, three and five preformed cracks. Beams are made of phenol-formaldehyde resin «Khromvinil V-276», reinforced with a layer of fiberglass «AG-4S». To specify different reinforcement densities $\mu = 0,1; 0,5; 1; 2; 3\%$, the height of the reinforcing layer varies. When modeling beams with preformed by cracks in the PC ANSYS applied previously tested an original way to crack modeling. Distributions of longitudinal, transverse and tangential deformations in the vicinity of the crack are obtained. The longitudinal section in the beam with preformed cracks is determined in which longitudinal deformations practically do not depend on reinforcement density. It was found that the length of the edge effect zone does not depend on the number of cracks in the beam. A technique was proposed for estimating the zone of the edge effect «from above» and «from below» in beams with preformed cracks.

K e y w o r d s: stress-strain state, edge effect zone, preformed crack, reinforcement density, numerical simulation, ANSYS.

REFERENCES

1. A d i s h c h e v V.V., M a l ' t s e v V.V., S h u l ' g a V.K. Issledovanie napryazhennno-deformirovannogo sostoyaniya v balkakh s zaranee organizovannymi treshchinami [Investigation of stress-strain state in the beam with preformed cracks]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2018. No. 3. Pp. 95–108. (in Russian)
2. M i t a s o v V.M., L o g u n o v a M.A. Konstruktsii s zaranee organizovannymi treshchinami [Structures with preformed cracks]. Vestnik TGASU [Bulletin of TSUAB]. 2015. No. 1. Pp. 115–121. (in Russian)
3. M i t a s o v V.M., L o g u n o v a M.A., S h a t o k h i n a M.V. Zhelezobetonnye balki s zaranee organizovannymi treshchinami pod vozdeystviem dlitel'noy nagruzki [Reinforced concrete beams with preformed cracks under dynamic load]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2013. No. 10. Pp. 5–10. (in Russian)
4. L o g u n o v a M.A., P e s h k o v A.S. Eksperimental'nye issledovaniya betonnykh balok bez organizovannykh treshchin i s zaranee organizovannymi treshchinami [Experimental research of concrete beams with and without cracks]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2011. No. 1. Pp. 116–120. (in Russian)
5. M i k h a y l o v a N.S. Eksperimental'nye issledovaniya zhelezobetonnykh balok bez treshchin i s zaranee namechennoy treshchinoj [Experimental Investigation of Reinforced Concrete Beams without Cracks and with Previously Intended Crack]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2007. No. 4. Pp. 110–113. (in Russian)

6. Mitasov V.M., Logunova M.A., Statsenko N.V. Vliyanie polozheniya zaranee organizovannykh treshchin na deformirovaniye zhelezobetonnykh elementov [Prcracking effect on deformation of reinforced concrete elements]. Vestnik TGASU [Bulletin of TSUAB]. 2016. No. 2. Pp. 139–147. (in Russian)
 7. Mitasov V.M., Logunova M.A., Statsenko N.V. Novye podkhody k resheniyu zadach deformirovaniya zhelezobetonnykh konstruktsiy s treshchinami [New approaches to the solution of the tasks of deformation of reinforced framings with cracks]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 1. Pp. 77–83. (in Russian)
 8. Murashov V.I. Treshchinoustoychivost', zhestkost' i prochnost' zhelezobetona [Crack-resistance, rigidity and strength of reinforced concrete]. Moscow, Mashstroyizdat, 1950. 268 p. (in Russian)
 9. Akhverdov I.N., Smol'skiy A.E., Skochelyas V.V. Modelirovaniye napryazhennogo sostoyaniya betona i zhelezobetona [Modeling the stressed state of concrete and reinforced concrete]. Minsk, Nauka i tekhnika, 1973. 231 p. (in Russian)
 10. Basov K.A. ANSYS: Spravochnik pol'zovatelya [ANSYS: User's manual]. Moscow, DMK Press, 2005. 640 p. (in Russian)
-

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ,
ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ.
ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ**



УДК 624.011.2 : 620.171.5 : 539.52

В.А. ЖИЛКИН

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ РАСТЯГИВАЕМОЙ ПЛАСТИНЫ
ИЗ ДРЕВЕСИНЫ С КРУГОВЫМ ОТВЕРСТИЕМ
С УПРУГИМ ВКЛЮЧЕНИЕМ**

В машиностроении и строительстве, как и в ряде других важных областей техники, возникает необходимость расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций из анизотропных материалов с отверстиями различной формы, подкрепленными по контуру упругими кольцами и накладками. Такие задачи представляют большой интерес для практики. Методики расчета подкрепленных отверстий основываются на методах конформного отображения, сингулярных интегральных уравнений, методе конечных элементов (МКЭ) и некоторых других. Целью данной работы было исследование НДС МКЭ толстой пластины с круговым отверстием из древесины сосны, растягиваемой вдоль волокон, для трех случаев граничных условий на поверхности отверстия: в отверстии нет упругого включения, в отверстие вставлено и приkleено к пластине тонкое дюралюминиевое кольцо, в отверстие без натяжения вставлен нагель, через который загружается пластина. Приведены эпюры напряжений в декартовой и цилиндрической системах координат в характерных сечениях пластины для всех трех граничных условий на поверхности отверстия. Предложены аналитические зависимости, аппроксимирующие эпюру контактных перемещений и эпюру радиальных напряжений точек контура отверстия пластины при их взаимодействии с нагелем.

Ключевые слова: МКЭ, MSC Patran-Nastran, ортотропия, контактная задача, пластина с круговым отверстием, пластина с упругим ядром, нагельное соединение.

Введение. Детальное изучение НДС в местах концентрации в условиях упругости, пластичности и ползучести является обязательной частью общего прочностного расчета соответствующих конструкций и важной предпосылкой для создания оптимальных и надежных конструкций. Изучению проблемы концентрации напряжений посвящено множество работ зарубежных и отечественных ученых [1–3]. Это связано с актуальностью проблемы в науч-

ном и практическом отношениях, ее многоплановостью и сложностью, поэтому многие важные ее аспекты до сих пор еще не имеют исчерпывающего решения.

Впервые решение плоской задачи теории упругости о распределении напряжений около кругового отверстия в пластине из изотропного материала, подверженной однородному растяжению величиной p в направлении оси x , было получено В. Киршем [4]. Исследование напряженного состояния пластиинки, ослабленной эллиптическим отверстием, осуществлено Г.В. Колосовым [5]. Общие решения для НДС ортотропных пластиинок с различными по форме отверстиями в комплексных переменных приведены в работах [6, 7]. Аналитические выражения для напряжений в замкнутой форме были получены только для ряда сечений пластины.

В пластине из ортотропного материала для направлений касательных к контуру отверстия модуль упругости E_θ определяется по формуле [6]

$$\frac{1}{E_\theta} = \frac{\sin^4 \theta}{E_1} + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\mu_{12}}{E_1} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\cos^4 \theta}{E_2}; \quad (1)$$

$$\frac{E_\theta}{E_1} = \frac{1}{\sin^4 \theta + m \sin^2 \theta \cos^2 \theta + k^2 \cos^4 \theta}, \quad (2)$$

а напряжения σ_θ – по формуле

$$\sigma_\theta = p \frac{E_\theta}{E_1} [-k \cos^2 \theta + (1+n) \sin^2 \theta], \quad (3)$$

где E_1 , E_2 – модули упругости в главных направлениях;

$$k = \sqrt{[E_1/E_2]}, \quad n = \sqrt{2k+m}, \quad m = E_1/G_{12} - 2\mu_{12};$$

G_{12} – модуль сдвига; μ_{12} – коэффициент поперечной деформации.

Анализ НДС пластиин в произвольных сечениях пластиинки требует применения численных методов. Кроме того, эти решения не учитывали специфику материалов пластиин, многообразие методов их соединения, что побуждало инженеров развивать экспериментальные методы оценки НДС конкретных изделий из анизотропных материалов [8, 9].

В данной работе методом конечных элементов исследуется НДС пластиин с круговым отверстием из древесины сосны, растягиваемой вдоль волокон, в программном продукте MSC Patran-Nastran [10]. Число узлов – 51 084; число 8-узловых изопараметрических элементов (HEXA) – 42 001; частота узлов у контура отверстия в 15,3 раза выше по сравнению с частотой полос на удалении от отверстия.

Растяжение ортотропной пластины с круговым отверстием. Размеры пластиини с круговым отверстием диаметром $d=25$ мм и способ ее закрепления приведены на рис. 1.

Начала декартовой и цилиндрической систем координат совместим с центром отверстия на внешней поверхности пластиинки, лежащей в плоскости xy . Оси декартовой системы координат x , y и z совпадают с главными осями

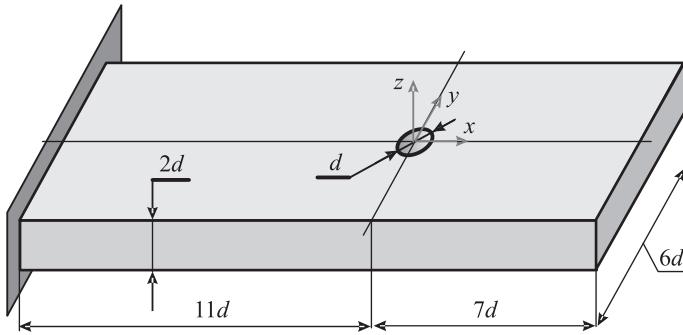


Рис. 1. Геометрическая схема образца

упругости материала пластины: 1 (вдоль волокон древесины), 2 (радиальное направление), 3 (тангенциальное направление).

Пусть к правому торцу пластины (вдоль первого главного направления) приложено растягивающее усилие $P = 2 \cdot 10^4$ Н, которое в сечениях, удаленных от отверстия, вызовет напряжения $\sigma_x = p = 2,667$ Н/мм².

Точкам левого торца пластины запретим перемещения в направлении осей x и z , а точкам, лежащим на оси симметрии в плоскости xoz , запретим перемещения в направлении оси y .

Упругие постоянные древесины сосны возьмем из [11]:

$$E_1 = 11\,700 \text{ Н/мм}^2; E_2 = 620 \text{ Н/мм}^2; E_3 = 500 \text{ Н/мм}^2;$$

$$G_{12} = 1140 \text{ Н/мм}^2; G_{13} = 690 \text{ Н/мм}^2; G_{23} = 670 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\mu_{12} = 0,49; \mu_{21} = 0,03; \mu_{13} = 0,41; \mu_{31} = 0,037; \mu_{23} = 0,79; \mu_{32} = 0,38.$$

Здесь E_i – модули упругости в главных направлениях;

G_{ij} – модули сдвига;

μ_{ij} – коэффициенты поперечной деформации.

Для ортотропного тела должны выполняться соотношения [6, 7]:

$$E_1\mu_{21} = E_2\mu_{12}; E_2\mu_{32} = E_3\mu_{23}; E_3\mu_{13} = E_1\mu_{31}.$$

Откуда $\mu_{12} = 0,566$; $\mu_{31} = 0,018$; $\mu_{23} = 0,471$. Эти величины и будут использованы в дальнейших численных расчетах вместо указанных ранее.

Распределение величин напряжений σ_x (рис. 2, *a*) и τ_{xy} (рис. 2, *б*) по внешней поверхности пластины представлено картинами изополей.

На рис. 3 приведены эпюры напряжений σ_θ : эпюра σ_θ построена по результатам КЭ расчета, эпюра σT_θ – по результатам вычислений напряжений σ_θ по формулам (1)–(3) теоретического решения. Распределения напряжений σ_θ и σT_θ вдоль контура отверстия для численного и теоретического решений качественно совпадают. Величины напряжений в зоне концентратора значительно отличаются: $K_T = 5,221$ и $K_{\text{числ}} = 4,353$. Относительная погрешность определения коэффициента концентрации напряжений σ_θ составила порядка 17 %.

Эпюры напряжений σ_x в опасном сечении пластины приведены на рис. 4, где $\sigma_{x_0}(\xi)$ – эпюра, построенная по данным КЭ расчета; $\sigma_{x_и}(\xi)$ – эпюра напряжений в такой же пластине из изотропного материала; σ_1 –

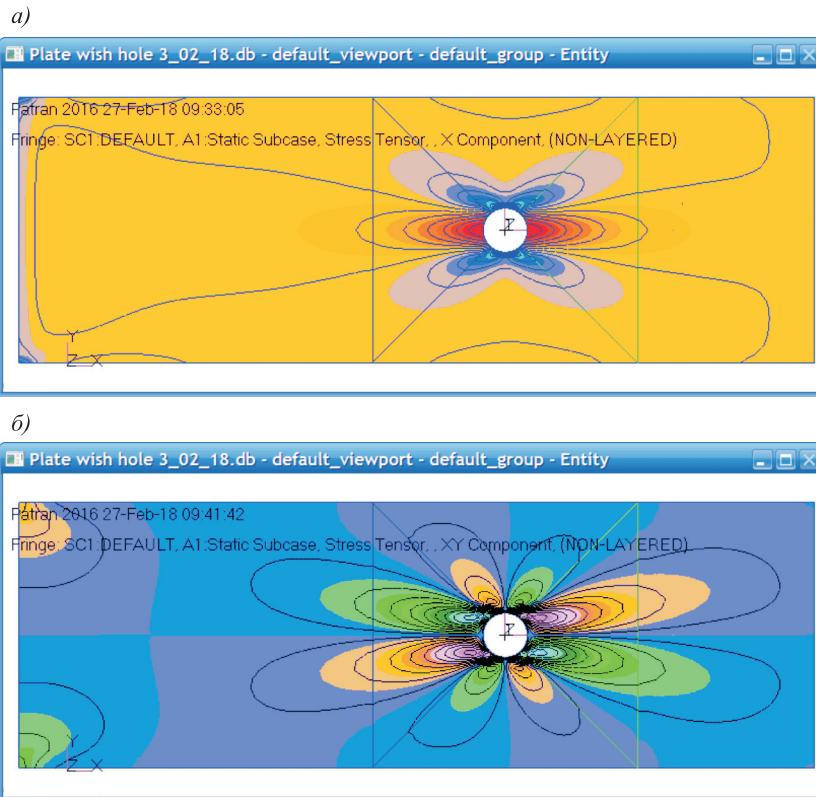


Рис. 2. Изополя напряжений σ_x (а), τ_{xy} (б) на поверхности пластины

20-элементный вектор напряжений σ_x в узлах КЭ сетки; Y – 20-элементный вектор координат u узлов сетки.

Из фрагмента картины полос рис. 4 следует, что эффект концентрации напряжений в опасном сечении, в отличие от изотропных материалов, оказывается на расстоянии приблизительно шага выбранной КЭ сетки ($3,72 \text{ мм} \sim d/6$ от отверстия) (ромбики – узлы КЭ сетки, цифры – величины напряжений σ_x).

Растяжение ортотропной пластины с вклеенной в отверстие пластины дюралюминиевой тонкостенной трубкой. В отверстие пластины вклеена без натяжения цилиндрическая трубка того же диаметра из дюралюминия

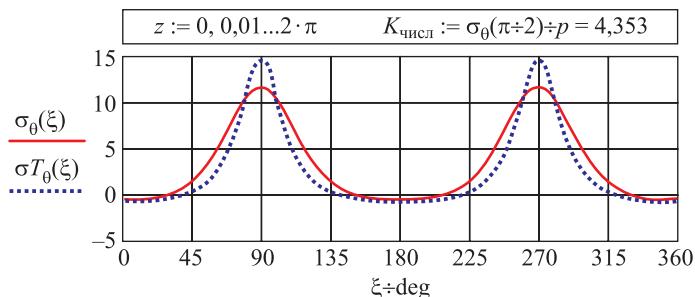


Рис. 3. Графики напряжений σ_0 и σT_0 вдоль контура отверстия

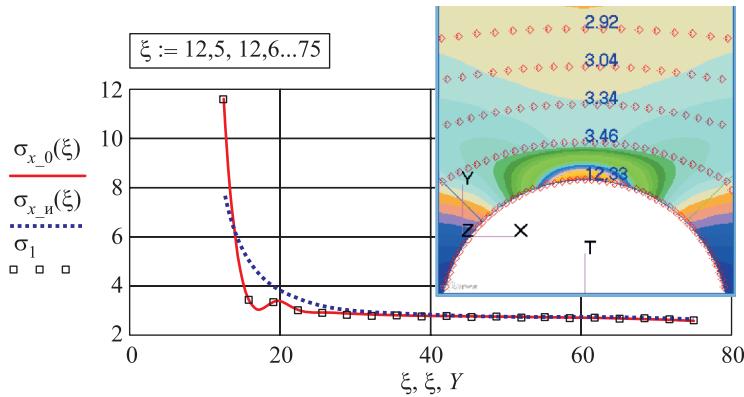


Рис. 4. Эпюры напряжений σ_x в опасном сечении пластин, изготовленных из изотропного материала $\sigma_{x_{ii}}(\xi)$ и материала сосны $\sigma_{x_0}(\xi)$

(внутренний диаметр трубы $d = 23$ мм). Упругие характеристики дюралюминия взяты из библиотеки материалов MSC Patran ($E = 71\,000$ Н/мм 2 , $\mu = 0,3$). К правому торцу пластины приложим усилие $P = 20$ кН, равномерно распределенное по площади сечения.

Изополя напряжений σ_x и τ_{xy} в пластине из материала сосны с вклеенной дюралюминиевой трубкой приведены на рис. 5.

Из рис. 5 следует, что в опасном сечении всплеск нормальных напряжений $\sigma_0 = \sigma_x$ наблюдается только вблизи трубы, в узле, примыкающем к трубке, $\sigma_0 = \sigma_x = 5,53$ МПа. Вклейка дюралюминиевой трубки позволила уменьшить величины напряжений в опасном сечении в зоне у концентра-

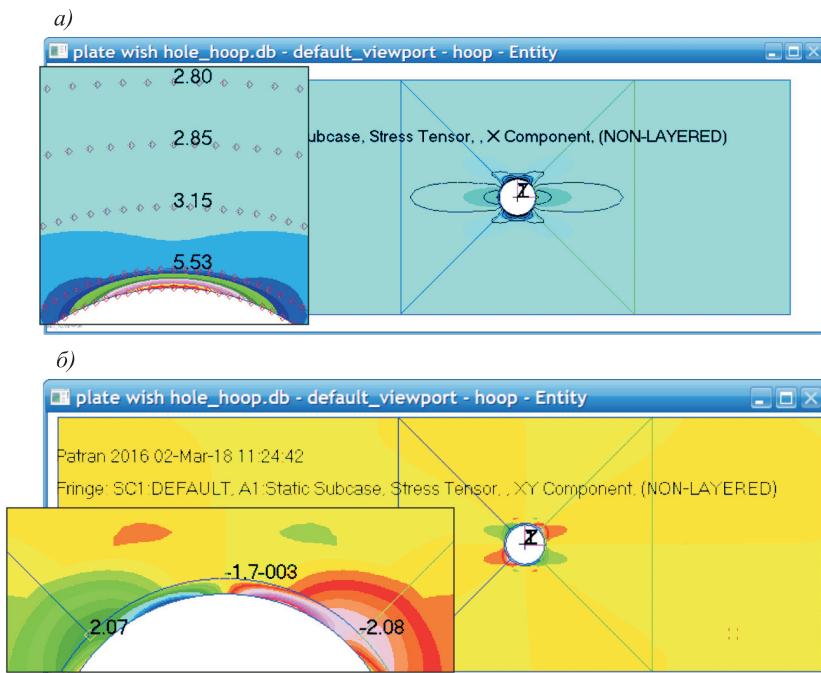
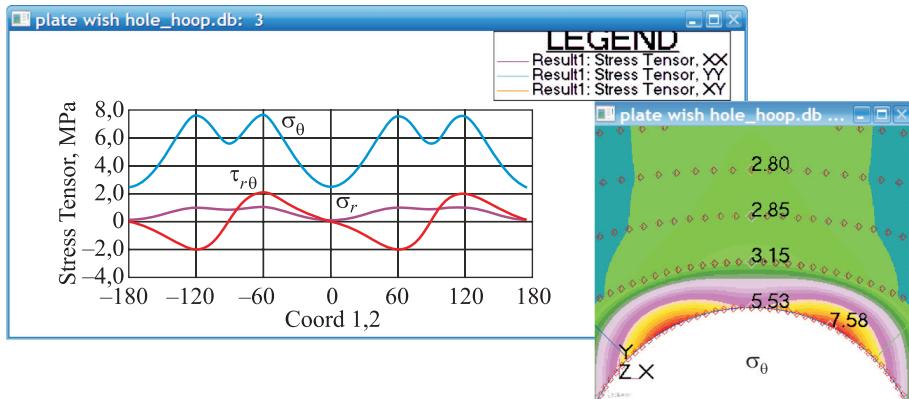


Рис. 5. Изополя напряжений σ_x (а), τ_{xy} (б) в пластине из материала сосны

Рис. 6. Эпюры напряжений σ_r , σ_θ и $\tau_{r\theta}$

тора (ср. с рис. 2). Коэффициент концентрации напряжения σ_θ в опасном сечении уменьшился $K_{\sigma\theta} = 5,53/2,67 = 2,07$. Напряжения $\sigma_r = \sigma_y$ во всех узлах сечения малы $\sigma_y < 0,5$, за исключением одного контактирующего с трубкой.

Эпюры напряжений σ_r , σ_θ и $\tau_{r\theta}$, представленные на рис. 6, вычислены в тех же узлах, что и приведенные на рис. 3. Характер изменения напряжений σ_θ стал иным: в опасном сечении пластины максимальные напряжения уменьшились, но подросли в точках контура определяемых дуговой координатой $\phi = \pm 60^\circ$, что подтверждает и картина изополос напряжений σ_θ (рис. 6). Дуговая координата ϕ отсчитывается от положительного направления оси x в направлении против хода часовой стрелки.

Из приведенных результатов численного расчета НДС пластины из сосны с вклеенной трубкой следует, что упругое включение в виде тонкостенной дюралюминиевой трубы перераспределяет и снижает величины напряжений в зоне отверстия пластины.

Растяжение ортотропной пластины перемещением дюралюминиевого нагеля, вставленного в отверстие пластины. В отверстие пластины вставлен нагель, внешний диаметр которого $D = 24,84$ мм, внутренний диаметр отверстия в нагеле $d = 4$ мм. Внутренним точкам поверхности нагеля задано перемещение $u_{\max} = 0,2$ мм.

В этом случае приходится решать контактную задачу о взаимодействии нагеля с поверхностью отверстия в древесине. КЭ сетка нагеля совмещена с КЭ сеткой поверхности цилиндрического отверстия по трем образующим, определяемым дуговыми координатами $\phi = 0^\circ$ и $\phi = \pm 3^\circ$. При решении контактной задачи оба тела, сосновая пластина и дюралюминиевый нагель, предполагались деформируемыми телами. Трение между нагелем и поверхностью отверстия пластины отсутствовало.

Начало теории сжатия упругих круговых цилиндров близких радиусов из изотропных материалов положено работами И.Я. Штаермана [12] и М.З. Народецкого [13]. Затем эта же задача при учете трения и без трения для тел с различными упругими свойствами рассматривалась во многих работах [13, 14]. Алгоритмы решения контактных задач программным продуктом

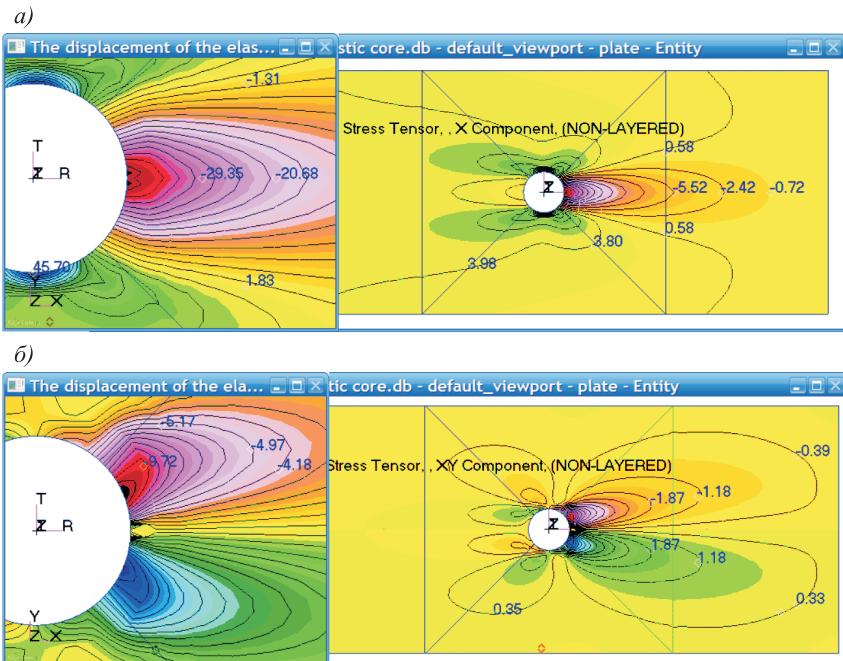


Рис. 7. Изополя напряжений σ_x (а), τ_{xy} (б) в пластине

MSC Patran-Nastran-Marc изложены в [15], подробные примеры решения таких задач приведены в [10, 16].

На рис. 7 представлены изополя напряжений σ_x и τ_{xy} в пластине.

Нормальные усилия в сечениях пластины, удаленных от отверстия, составили $N = 31\ 800$ Н.

Изополя напряжений τ_{xy} , приведенные на рис. 7, б, подобны картице полос в фотоупругом покрытии из материала ЭД-6М толщиной 1,5 мм (рис. 8), наклеенном на аналогичную по размерам пластинку из сосны [8].

На рис. 9 приведены изополя перемещений u в направлении координатной оси x на внешней поверхности пластины, когда нагелю задавалось перемещение $u_{max} = 0,1$ мм.

Перемещения точек сосны в зоне выкалывания составили $\sim 0,5 u_{max}$.

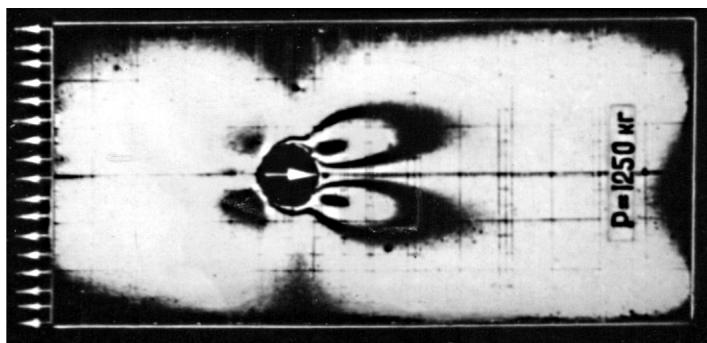


Рис. 8. Картина полос τ_{max} в фотоупругом покрытии

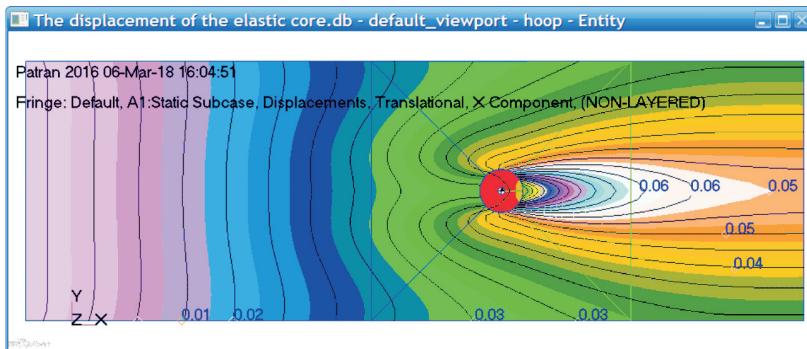


Рис. 9. Изополя перемещений u в направлении координатной оси x

Эпюра перемещений точек контура отверстия в цилиндрической системе координат в направлении радиуса ($\text{Coord}1,2 \equiv u(\varphi)$, где φ – дуговая координата) приведена на рис. 10.

Кривая, представленная на рис. 10, напоминает кривую Гаусса, описывающую закон распределения ошибок в одномерном случае:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (4)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение;

μ – математическое ожидание.

Полагая $\mu=0$ и смещая кривую на величину перемещения u в узле с дуговой координатой $\varphi=-180^\circ$, преобразуем зависимость (4) к виду

$$u(\varphi, \xi) = \frac{1}{K(\xi) \xi \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\varphi^2}{2\xi^2}} + u_{\min}, \quad K(\xi) = \frac{1}{\xi(u_{\max} - u_{\min})\sqrt{2\pi}}, \quad (5)$$

где ξ – параметр, определяющий ширину средней части колоколообразной кривой, подбирается экспериментально;

φ – дуговая координата, рад;

u_{\max} и u_{\min} – величина максимального и минимального перемещений точек контура отверстия в пластине.

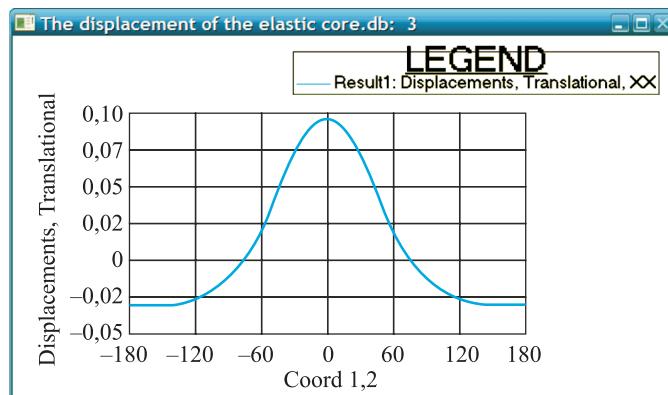


Рис. 10. Эпюра перемещений точек контура отверстия в направлении радиуса

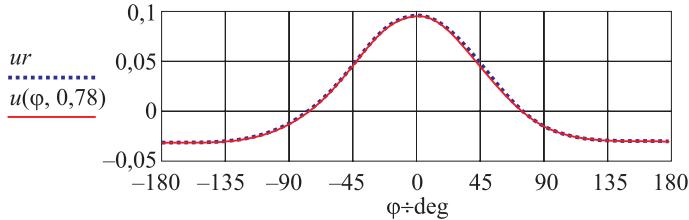


Рис. 11. Сопоставление результатов численного и аналитического расчетов перемещений точек контура отверстия

На рис. 11: ur – численные результаты, $f(z, \xi)$ – график функции (5). Зависимость (5) достаточно хорошо аппроксимирует численные результаты.

Очень важным с точки зрения построения теоретического решения задачи является вопрос о распределении нормальных и касательных напряжений, возникающих по поверхности контакта между штампом и древесиной. Поэтому одной из частных задач исследования было установление эпюров этих напряжений. На рис. 12 представлены эпюры контактных напряжений σ_r , σ_θ и $\tau_{r\theta}$, вычисленные в узлах контура отверстия.

Узлы, лежащие на образующих нагеля при $\phi = 0^\circ, \pm 3^\circ$, объединены с узлами внутренней поверхности пластины и поэтому в этих узлах напряжения не являются контактными.

Зона контакта упругого ядра и пластины составила $\phi \in [-56,814^\circ, +56,814^\circ]$. Экстремумы функций σ_θ и τ практически совпадают. Коэффициент концентрации напряжений σ_x в опасном сечении пластины равен $K_{\text{числ}} = 10,777$.

Видоизмененная формула (5)

$$f(\phi, \xi) = \frac{1}{R(\xi)\xi\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\phi^2}{2\xi^2}} + (\sigma_r)_{\text{last}(\sigma_r)}, \quad (6)$$

где $R(\xi) = \frac{\text{sign}\left((\sigma_r)_{\text{trunc}\left(\frac{\text{last}(\sigma_r)}{2}\right)}\right)}{\xi \cdot (|\min(\sigma_r)| - |\max(\sigma_r)|) \cdot \sqrt{2\pi}}$; $\text{trunc}(z)$ – функция MathCAD возвращает целую часть z , удаляя дробную часть; функция $\text{last}(v)$ – возвращает

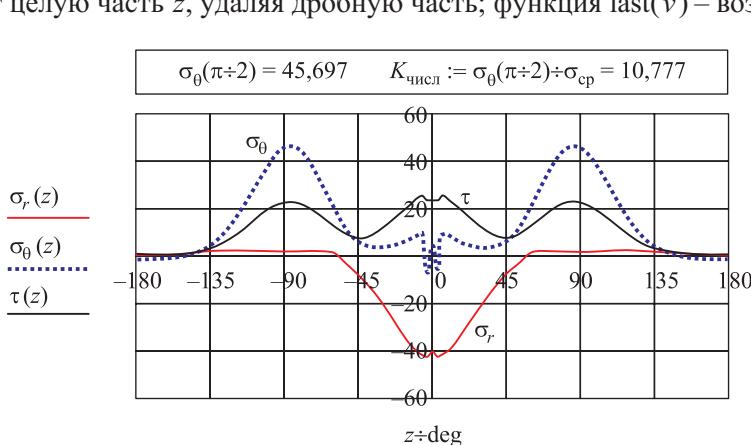


Рис. 12. Эпюры контактных напряжений σ_r , σ_θ и $\tau_{r\theta}$, вычисленные в узлах контура отверстия

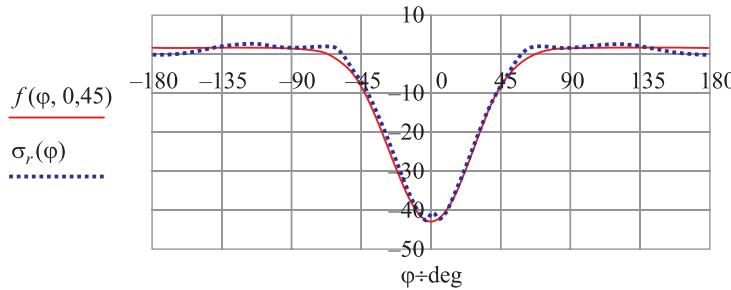


Рис. 13. Сопоставление результатов численного и аналитического расчетов напряжений σ_r в точках контура отверстия

скалярный индекс последнего элемента вектора v , достаточно хорошо аппроксимирует эпюру напряжений σ_r (рис. 13).

Эпюры напряжений σ_x и σ_y вдоль оси симметрии $y = 0$ приведены на рис. 14. Величины напряжений σ_r в узлах контура отверстия, прилежащих к оси симметрии, приведены на рис. 14, б, из которого следует, что значению $\sigma_r = -40,55$ Н/мм², лежащему на оси симметрии, доверять не следует (дефект граничных условий!), так как величина напряжений σ_r в этой точке должна быть максимальной, по крайней мере больше $\sigma_r = -42,41$ Н/мм².

Напряжения σ_x в рассматриваемом сечении можно аппроксимировать выражением (рис. 15)

$$B(x) = \beta \left(\operatorname{th} \left(\frac{3,3 \cdot (x - r)}{x_{\text{last}}(xv) - r} \right)^{0,65} - 1 \right), \quad (7)$$

где $\beta = \sigma_{\text{ср}} \cdot K_{\text{числ}}$;

r – радиус отверстия в пластине;

$x_{\text{last}}(xv)$ – координата крайней правой точки сечения;

xv – вектор координат x узлов сетки;

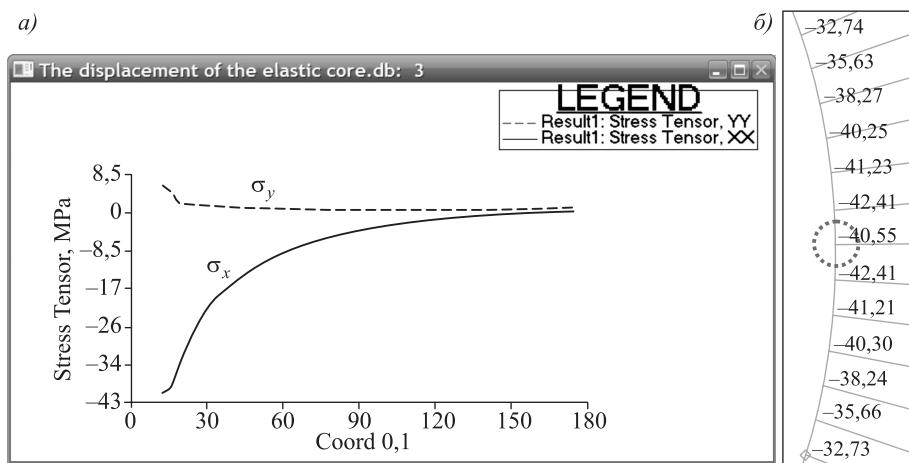


Рис. 14. Эпюры напряжений σ_x и σ_y вдоль оси симметрии $y = 0$

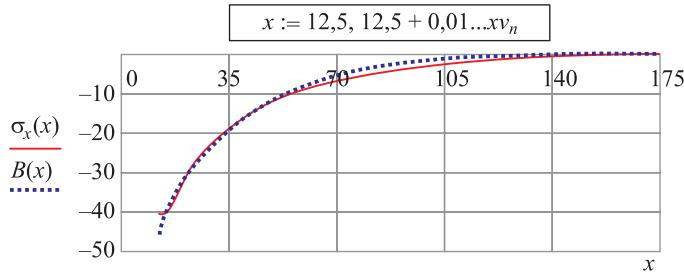


Рис. 15. Сопоставление эпюров напряжения σ_x , вычисленных по формуле (7) и полученных в результате КЭ расчета

коэффициент 3,3 выбран из условия, что $\text{th}(3,3) = 0,997 \sim 1$; показатель степени определяется средним градиентом функции $\sigma_x(z)$ в узлах, прилегающих к отверстию.

По направлению предполагаемых площадок скальвания (на рис. 16 это линии, касающаяся отверстия) КЭ модель не имеет узлов, а поэтому корректные эпюры напряжений для этих сечений вывести не удается. Можно вывести приближенные эпюры напряжений, если воспользоваться информацией о напряженном состоянии элементов (на рис. 16 это выделенные элементы).

Эпюры осредненных величин напряжений σ_x , σ_y и τ_{xy} приведены на рис. 17, на котором Coord 0,1 $\equiv x$ (0 – глобальная декартовая система координат xyz, 1 – ось x).

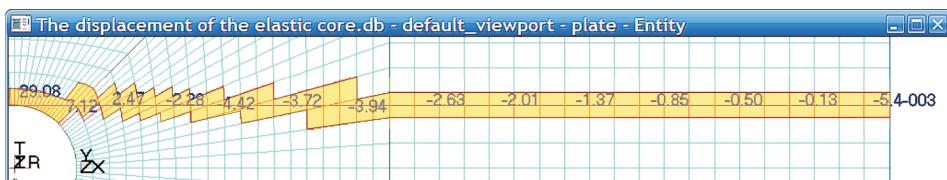


Рис. 16. Элементы, в которых вычисляются напряжения σ_x , σ_y и τ_{xy}

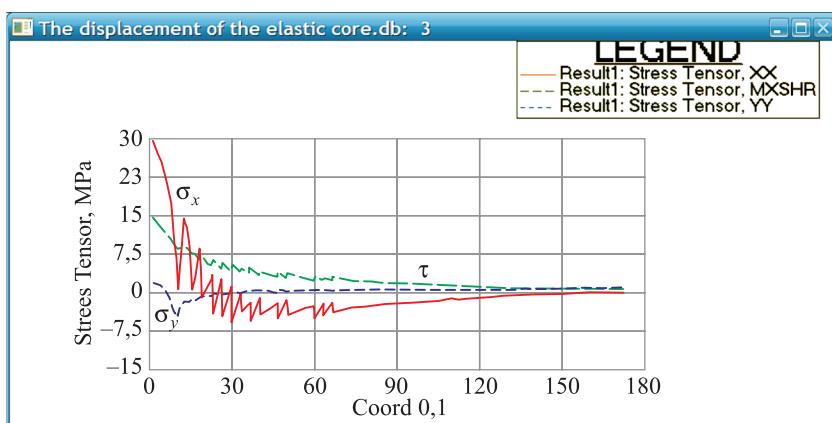


Рис. 17. Эпюры осредненных величин напряжений σ_x , σ_y и τ_{xy} в сечении $y = 12,5$ мм

Выводы. 1. Вклеенное в отверстие пластины из древесины тонкое упругое металлическое колечко перераспределяет и снижает величину максимальных напряжений в опасном сечении пластины.

2. Зона контакта нагеля и пластины из древесины составила $\pm 60^\circ$.
3. Аналитические выражения (5–7) позволяют оценить величину контактных напряжений при смятии древесины в отверстии цилиндрическим штампом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А ннин Б.Д., О стро с абли н Н.И. Анизотропия упругих свойств материалов // Прикл. механика и техн. физика. 2008. Т. 49. № 6. С. 131–151.
2. З орин С.А., М акс имен ко В.Н. Расчет напряженно-деформированного состояния анизотропной пластины с эллиптическим отверстием и тонкими упругими включениями // Механика твердого тела. 2008. № 2. С. 79–89.
3. F oust B.E., L esniak J.R., R owl ands R.E. Stress Analysis of a pinned wood joint by grey-field photoelasticity. Composites Part B: Engineering. 2014. Vol. 61. Pp. 291–299.
4. Kirsch G. Die Theorie der Elastizität und Bedürfnisse der Festigkeitslehre, Zeitschrift, d. VDI, 1898, Bd. 42. S. 797.
5. К олосов Г.В. Применение комплексной переменной к теории упругости. Л.; М.: ОНТИ, 1935. 227 с.
6. Л ехни цкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. М.; Л.: Гостехиздат, 1950. 300 с.
7. С авин Г.Н. Распределение напряжений около отверстий. Киев: Наук. думка, 1968. 891 с.
8. Д митриев П.А., Ж илкин В.А., С трижа ков Ю.С. Исследование смятия древесины в отверстии с помощью оптически чувствительных покрытий // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1971. № 2. С. 18–24.
9. П урто в В.В., П а влик А.В. Работа на смятие в отверстиях малых диаметров // Изв. вузов. Строительство. 2005. № 5. С. 106–110.
10. Ж илкин В.А. Азбука инженерных расчетов в MSC Patran-Nastran-Marc. СПб.: Проспект Науки, 2013. 574 с.
11. А шкенази Е.К., Ганов Э.В. Анизотропия конструкционных материалов. Л.: Машиностроение, 1980. 247 с.
12. Ш та ерман И.Я. Контактная задача теории упругости. М.; Л.: Гостехиздат, 1949. 272 с.
13. Развитие теории контактных задач в СССР. М.: Наука, 1976. 493 с.
14. Т е п лы й М.И. Контактные задачи для областей с круговыми границами. Львов: Вища шк., 1983. 176 с.
15. Marc Volume A: Theory and User Information. 794 p.
16. Ж илкин В.А. Моделирование и статический расчет элементов конструкций в MSC Patran-Nastran-Marc. СПб.: Проспект Науки, 2016. 240 с.

Жилкин Виталий Афанасьевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: zhilkin_vitalii@mail.ru
Южно-Уральский аграрный университет

Получено после доработки 02.04.18

Zhilkin Vitaliy Afanas'evich, DSc, Professor; E-mail: zhilkin_vitalii@mail.ru
South Ural State Agrarian University, Russia

INVESTIGATION OF STRESS-DEFORMED STATUS OF PLATE FROM WOOD WITH CIRCULAR HOLE WITH ELASTIC NUCLEUS IN MSC PATRAN-NASTRAN

In mechanical engineering, in construction and in a number of other important areas, there is a need to calculate the stress-strain state (SSS) of structures made of anisotropic materials with holes of various shapes, reinforced along the contour by elastic rings and patches. Such problems are of great interest for practice. The methods for calculating the reinforced holes are based on the methods of conformal mapping, singular integral equations, finite element method (FEM), and some others. The purpose of this paper was to study the SSS of a thick plate with a circular hole of pine wood stretched along the fibers for three cases of boundary conditions on the hole surface: there is no elastic core in the hole, a thin duralumin ring, a hole is inserted into the hole without tension, through which the plate is loaded. Stress diagrams are given in Cartesian and cylindrical coordinate systems in characteristic sections of the plate for all three boundary conditions on the surface of the hole. Analytical dependences approximating the diagram of contact displacements and the diagram of radial stresses of points of the outline contour of the plate hole are proposed in their interaction with nagel.

К e y w o r d s: SSS, MSC Patran-Nastran, orthotropy, contact problem, plate with circular hole, plate with elastic core, nagelnoe connection.

REFERENCES

1. Annin B.D., Ostrosablin N.I. Anizotropiya uprugikh svoystv materialov [Anisotropy of elastic properties of materials]. Prikladnaya mehanika i tekhnicheskaya fizika [Applied Mechanics and Technical Physics]. 2008. Vol. 49. No. 6. Pp. 131–151. (in Russian)
2. Zorin S.A., Maksimenko V.N. Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya anizotropnoy plastiny s ellipticheskim otverstiem i tonkimi uprugimi vkl'yucheniymami [Calculation of the stress-strain state of an anisotropic plate with an elliptical hole and fine elastic inclusions]. Mekhanika tverdogo tela [Mechanics of a solid]. 2008. No. 2. Pp. 79–89. (in Russian)
3. Foust B.E., Lesniak J.R., Rowlands R.E. Stress Analysis of a pinned wood joint by gray-field photoelasticity. Composites Part B: Engineering. 2014. Vol. 61. Pp. 291–299.
4. Kirsch G. Die Theorie der Elastizität und Bedürfnisse der Festigkeitslehre, Zeitschrift, d. VDI, 1898, Bd. 42. S. 797.
5. Kolosov G.V. Primenenie kompleksnoy peremennoy k teorii uprugosti [Application of a complex variable to the theory of elasticity]. Leningrad; Moscow, ONTI, 1935. 227 p. (in Russian)
6. Lezhnitskiy S.G. Teoriya uprugosti anizotropnogo tela [Theory of elasticity of an anisotropic body]. Moscow; Leningrad, Gostekhizdat, 1950. 300 p. (in Russian)
7. Savin G.N. Raspredelenie napryazheniy okolo otverstiya [Stress distribution near the holes]. Kiev: Naukova Dumka, 1968. 891 p. (in Russian)
8. Dmitriev P.A., Zhilkin V.A., Strizhakov Yu.S. Issledovanie smyatiya drevesiny v otverstii s pomoshch'yu opticheskikh chuvstvitel'nykh pokrytiy [A study of the crushing of wood in a hole by means of optically sensitive coatings]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and architecture]. 1971. No. 2. Pp. 18–24. (in Russian)
9. Purtov V.V., Pavlik A.V. Rabota na smyatie v otverstiyakh malykh diametrov [Work on the crumple in holes of small diameters]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2005. No. 5. Pp. 106–110. (in Russian)

10. Zhilkin V.A. Azbuka inzhenernykh raschetov v MSC Patran-Nastran-Marc [The ABC of engineering calculations in MSC Patran-Nastran-Marc]. Saint-Petersburg, Prospect of Science, 2013. 574 p. (in Russian)
 11. Ashkenazi E.K., Ganov E.V. Anizotropiya konstruktsionnykh materialov [Anisotropy of structural materials]. Leningrad, Mechanical Engineering, 1980. 247 p. (in Russian)
 12. Shterman I.Ya. Kontaktnaya zadacha teorii uprugosti [Contact problem of the theory of elasticity]. Moscow, Leningrad, Gostekhizdat, 1949. 272 p. (in Russian)
 13. Razvitiye teorii kontaktnykh zadach v SSSR [Development of the theory of contact problems in the USSR]. Moscow, Nauka, 1976. 493 p. (in Russian)
 14. Teplyy M.I. Kontaktnye zadachi dlya oblastey s krugovymi granitsami [Contact problems for regions with circular boundaries]. Lvov: Vyshcha shkola, 1983. 176 p. (in Russian)
 15. Marc Volume A: Theory and User Information. 794 p.
 16. Zhilkin V.A. Modelirovanie i staticheskiy raschet elementov konstruktsiy v MSC Patran-Nastran-Marc [Modeling and static calculation of design elements in MSC Patran-Nastran-Marc]. Saint-Petersburg, Prospect of Science, 2016. 240 p. (in Russian)
-

УДК 624.011.1

И.И. ЛИСИЦКИЙ, В.И. ЖАДАНОВ, И.В. РУДНЕВ, Д.А. УКРАИНЧЕНКО

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА СТАЛЬНЫХ ВКЛЕЕННЫХ ПЛАСТИНАХ

Повышение прочности, жесткости и надежности деревянных конструкций неразрывно связано с вопросами совершенствования их узловых сопряжений. Применение новых типов соединительных деталей является наиболее эффективным способом достижения качественного скачка в вопросах расширения номенклатуры конструкций на основе древесины и, соответственно, повышения их конкурентоспособности на строительном рынке. Рассматриваются вопросы применения стальных вклеенных пластин в соединениях деревянных конструкций. Показана широкая область их возможного использования. Отмечено, что до настоящего времени в нормативной литературе отсутствует обоснованная методика расчета рассматриваемого класса соединений, учитывающая его особенности. Приведены конструктивные решения стыков несущих деревянных конструкций с вклеенными пластинами, а также результаты экспериментов и численных расчетов напряженно-деформированного состояния элементов разработанных соединений методом конечных элементов. Выявлено, что несущая способность соединения изменяется в зависимости от способа обработки поверхности пластин. Предложена эмпирическая формула определения несущей способности рассматриваемого класса соединений, удобная для практических инженерных вычислений.

Ключевые слова: деревянные конструкции, узлы, соединение, вклеенная стальная пластина, поверхность, обработка, отверстие, несущая способность.

Несмотря на множество типов соединений деревянных конструкций, которые имеют свои положительные стороны, а также и свои недостатки, вопросы их совершенствования актуальны и в настоящее время [1–4]. Это связано, в частности, со значительным увеличением применения у нас в стране и за рубежом большепролетных конструкций зданий и сооружений, что, в свою очередь, вызывает необходимость повышения несущей способности и жесткости узловых сопряжений.

Для достижения качественного скачка в вопросах разработки соединений элементов конструкций на основе древесины с высокой степенью эксплуатационной надежности необходимо применение новых типов соединительных деталей. По аналогии с вклеенными в массив древесины арматурными стальными стержнями, обеспечивающими жесткость узлов [5–7], с конструкторской точки зрения заслуживает внимания введение в практику новых типов вклеенных элементов в виде стальных пластин. Такое решение позволяет легко проектировать узловые соединения различных типов плоских и пространственных конструкций, исключить сварочные работы, являющиеся неотъемлемой частью выполнения соединений на вклеенных стержнях. Однако до настоящего времени стальные пластины в узловых

сопряжениях деревянных конструкций не нашли должного применения из-за своей малой несущей способности. Проведенные еще в 60-гг. прошлого столетия эксперименты показали, что даже при незначительных нагрузках разрушение опытных образцов происходило по контакту «клей–металл» из-за слабого сцепления клеевой композиции с поверхностью стальной пластины. В 2012 г. профессор П.А. Дмитриев предложил устранить этот недостаток за счет обработки поверхности вклеиваемой части пластин. Проведенные эксперименты при участии авторов настоящей статьи показали эффективность сделанного предложения. В частности, при применении пластин, у которых вклеиваемая в массив древесины часть имела насечки, накатку или профрезерованные пазы, несущая способность соединения повышалась по сравнению с гладкими более чем в 2 раза [8, 9]. Полученные значения прочности позволили рекомендовать использование таких соединений в узлах сквозных конструкций, перекрестно-балочных систем, рамных, арочных конструкциях. Предложенные авторами варианты конструктивных решений соединений на вклеенных стальных пластинах приведены на рис. 1.

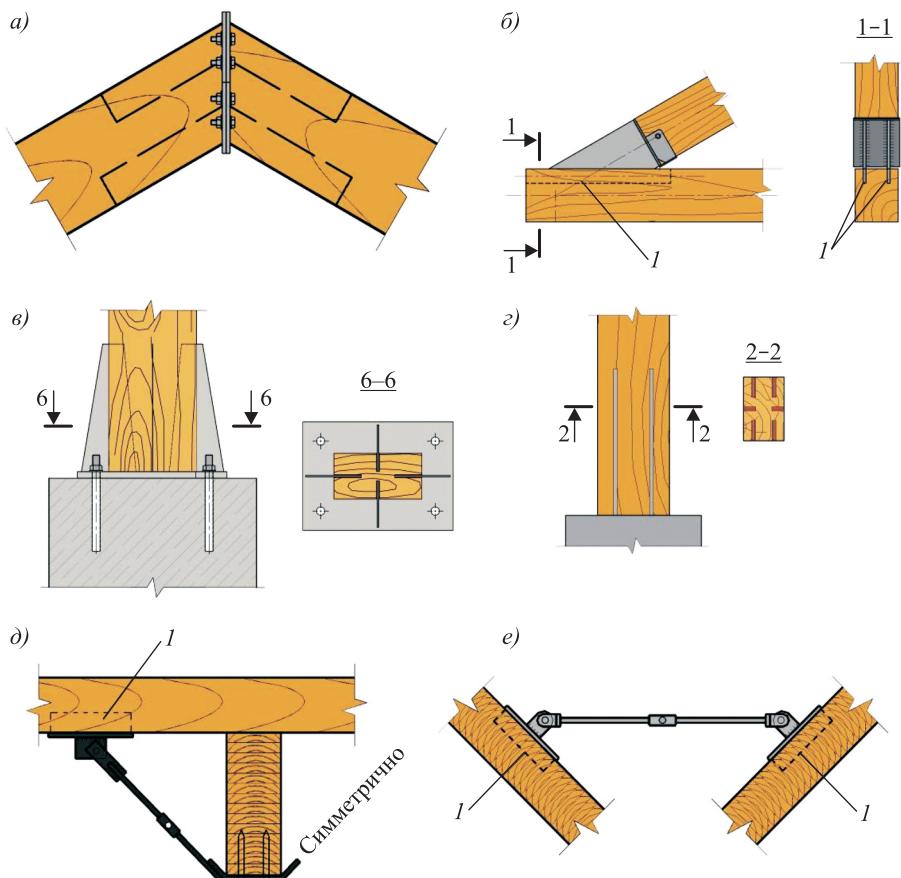


Рис. 1. Варианты узлов деревянных конструкций с применением стальных вклеенных пластин

а – коньковый узел; б – опорный узел; в – разборный узел крепления колонны к фундаменту; г – то же, неразборный; д – обеспечение устойчивости плоской формы балок стальными затяжками; е – соединение элементов деревянной складки в ендове

Однако опытное проектирование показало необходимость в еще большем увеличении несущей способности пластин, отнесенной к единице ее поверхности. С другой стороны, в нормативной литературе отсутствует обоснованная методика расчета рассматриваемого класса соединений, учитываяшая его особенности. Все вышеизложенное предопределило необходимость проведения дальнейших исследований соединений деревянных конструкций на стальных вклеенных пластинах с целью повышения их несущей способности, которая напрямую зависит от способа обработки поверхности пластин.

Для определения наиболее эффективного способа обработки вклеиваемых частей пластин выполнены численные исследования напряженно-деформированного состояния соединений, у которых пластины имели поверхность с различными способами обработки. Для обеспечения сравнения данных размеры образцов были полностью идентичны образцам, принятым в ранее проведенных исследованиях [9]. Общий вид образца для проведения численных и экспериментальных исследований представлен на рис. 2.

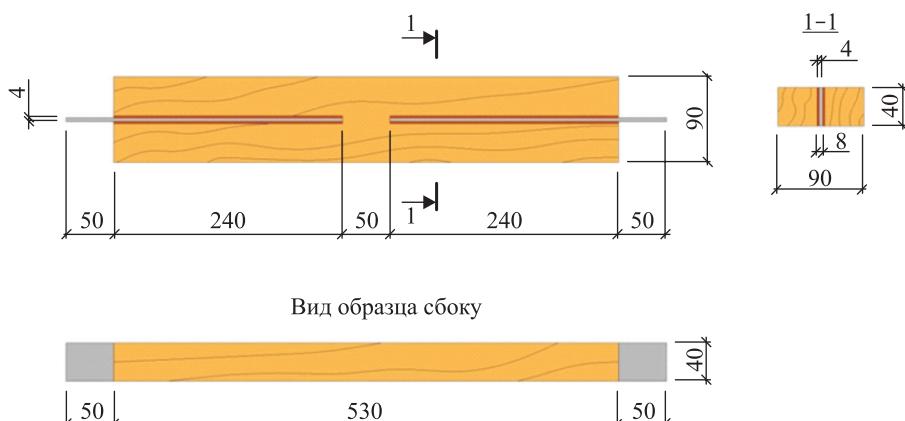


Рис. 2. Общий вид образца на вклешенных стальных пластинах для проведения численных и экспериментальных исследований

Для твердотельного моделирования составляющих клеевого соединения стальной пластины с деревянным бруском в программных комплексах ANSYS и APMCivilEngineering были использованы объемные конечные элементы «Solid185» тетраэдрической формы и прямоугольные параллелепипеды соответственно. Размеры конечного элемента приняты в пластине, kleевой прослойке и в древесине в зоне контакта с kleem с таким расчетом, чтобы в самом тонком слое, в данном случае в слое kleя, по толщине размещалось не менее двух конечных элементов, что обеспечивает корректность вычислений. В качестве вариантов рассматривались пластины, вклеиваемая поверхность которых имела профрезерованные пазы, расположенные перпендикулярно продольной оси пластины и под углом к ней. Такой способ обработки определен ранее проведенными исследованиями И.В. Руднева как наиболее эффективный [10]. Наиболее характерные карты распределения нормальных и касательных напряжений в брусе приведены на рис. 3.

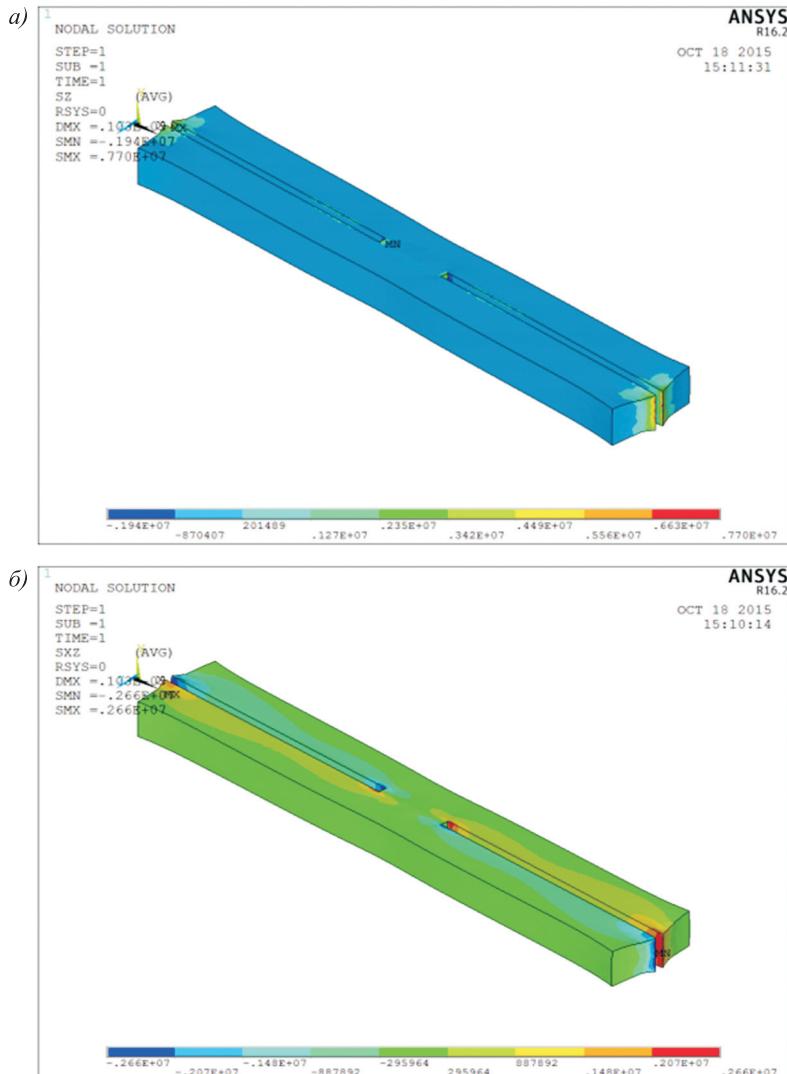


Рис. 3. Карты распределения напряжений в брусе (Па), вызывающих разрушение kleевого соединения стальной пластины с древесиной (образец с пазами, расположенными под углом 45° к продольной оси пластины)

a – карта нормальных напряжений σ_y ; *б* – касательных напряжений τ_{xy}

Анализируя результаты численных исследований, следует отметить, что при выдергивании пластины из древесины в соединении действуют наиболее опасные с точки зрения его разрушения касательные напряжения τ_{xy} , вызывающие скол древесины, и нормальные к вклеенной поверхности пластины напряжения σ_y , вызывающие отрыв контактных поверхностей друг от друга. Причем максимальные значения как нормальных, так и касательных напряжений находятся у торца деревянного элемента. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили адекватность численных расчетов и показали, что разрушение опытных образцов начинается с отрыва kleевой прослойки у торца деревянного бруса по контакту «клей–металл» или

«клей–древесина» с дальнейшим скальванием клеевой прослойки по шву «клей–древесина» по всей длине вклеенной части.

Полученные результаты численных и экспериментальных исследований позволили констатировать, что при помощи профрезерованных на вклеиваемых поверхностях пластины пазов (наиболее рациональными являются угол наклона паза в $45\pm3^\circ$ к продольной оси пластины и его глубина $0,25t_{пл}$ при ширине паза 10 мм и шаге пазов 25 мм), с одной стороны, обеспечивается достаточная степень адгезии по слою «клей–металл», с другой стороны, эти пазы не обеспечивают восприятие нормальных к продольной оси образца напряжений, вызывающих отрыв контактных поверхностей друг от друга. Эти результаты позволили авторам выдвинуть гипотезу о целесообразности применения для обработки поверхности пластин сквозных высуверленных отверстий, в которых клеевая композиция будет выполнять роль шпонки, воспринимающей нормальные отрывные напряжения, за счет чего можно добиться повышения несущей способности соединения в целом.

Для подтверждения выдвинутой гипотезы проведены экспериментальные исследования образцов соединений с применением стальных вклеенных пластин по рис. 2 с различными способами обработки поверхности. Для объективности полученных результатов были испытаны образцы четырех типов: с гладкими (без дополнительной обработки) пластины (серия 1); с пластины с прямыми и наклонными (под оптимальным углом наклона паза к продольной оси образца 45°) пазами (серии 2 и 3); пластины с четырьмя отверстиями диаметром 20 мм (серия 4). Каждый образец обеспечивал получение дублирующих данных по деформациям за счет двухсторонней вклейки пластин, синхронность работы которых контролировалась индикаторами часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм. Также при помощи этих индикаторов контролировали и величину смещения невклеенной части пластины относительно торца деревянного элемента.

Материал бруса – сосна 2-го сорта, влажность 12 %, сечение 90×40 мм. Пазы для вклейвания пластин размером 8×40 мм обеспечивали толщину клеевого слоя ≈ 2 мм с каждой стороны пластин. Длина пазов равна длине вклеиваемой части пластин 240 мм. Пазы в одном брусе разделены между собой участком сплошного сечения 90×40 мм длиной 50 мм. Материал вклеиваемых пластин – сталь Ст3 (ГОСТ 380–2005), сечением 4×40 мм. Общая длина пластин складывается из длины вклеиваемой части и длины, необходимой для захвата образца в зажим испытательной машины (50 мм). На образцах серий 2 и 3 с двух сторон пластин на вклеиваемой части фрезеровали пазы шириной 10 мм и глубиной 1,0 мм с шагом 10 мм, расположенные на двух поверхностях в шахматном порядке с шагом 40 мм. В серии 4 были применены пластины с четырьмя сквозными отверстиями диаметром 20 мм, высуверленными равномерно по длине вклеиваемой части. Общий вид вклеиваемых пластин четырех серий представлен на рис. 4.

Клей для фиксации пластин в брусе – эпоксидная двухкомпонентная смола марки ЭДП (ТУ 2385-024-75678843–2010), без наполнителя.

Экспериментальные исследования проведены на испытательной машине ИР 5082-100 (с максимальным усилием 10 т). Контролируемые параметры

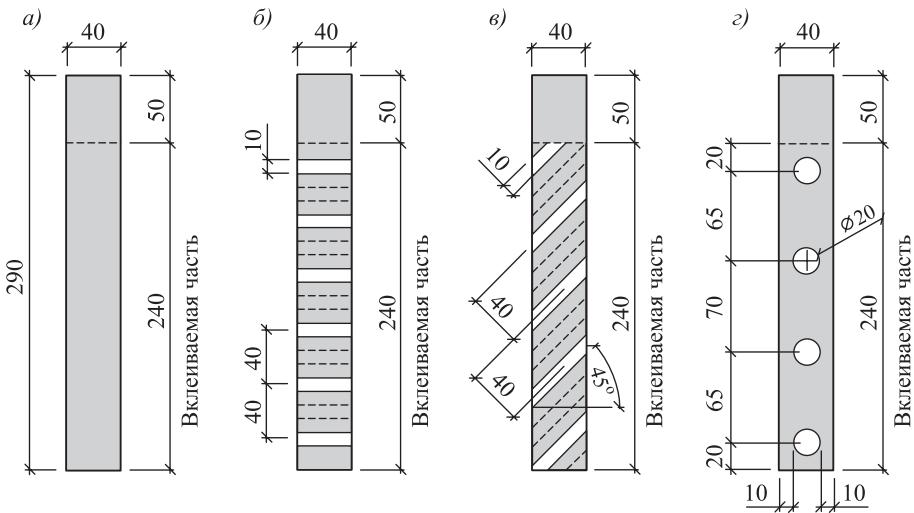


Рис. 4. Варианты обработки вклеиваемой части пластин

а – гладкая пластина (серия 1); б – пластина с прямыми пазами (серия 2); в – пластина с наклонными пазами (серия 3); г – пластина с отверстиями (серия 4)

ры испытательной машины: нагрузка, перемещение, скорость перемещения траверсы. Установка испытываемого образца осуществляется защемлением выступающих частей вклеенных пластин в клиновые захваты машины. Растягивающая нагрузка на образец прикладывается плавно без остановки до разрушения. Общий вид образца, установленного в испытательную машину, представлен на рис. 5. В каждой серии было испытано по пять образцов. В маркировку экспериментальных образцов входили: номер серии (С1-С4); способ обработки поверхности пластин (Г – гладкая, ПП – прямые пазы,

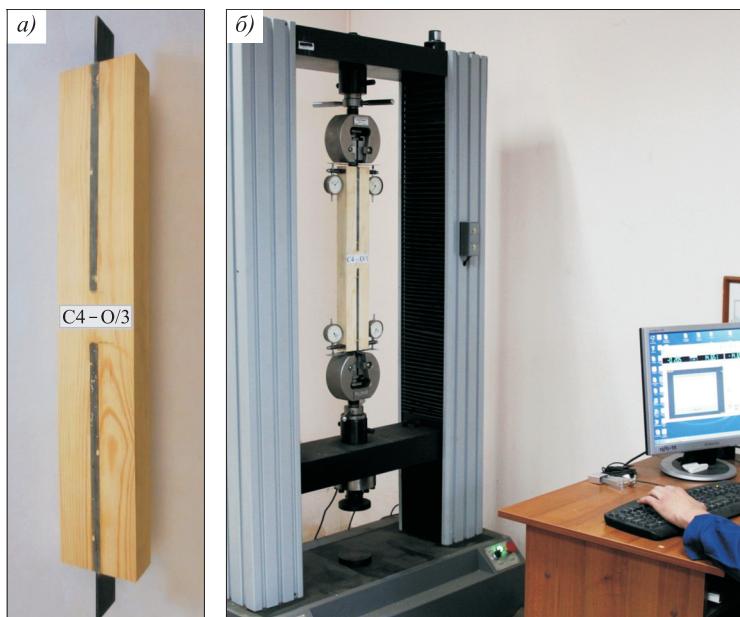


Рис. 5. Экспериментальный образец (а) и момент его испытания (б)

НП – наклонные пазы, О – отверстия); номер образца (1–5). Пример маркировки: С4-О/3 – серия 4, пластина с отверстиями, образец № 3.

Анализ полученных результатов позволил выявить существенный эффект влияния способа обработки поверхностей стальных пластин на несущую способность соединений с их применением. Так, средняя разрушающая нагрузка для гладких пластин в первой серии образцов составила 9,8 кН. При этом диапазон экспериментальных значений этих нагрузок находился в интервале от 9,2 кН (образец С1-Г/3) до 10,3 кН (образец С1-Г/2). Другие три образца разрушились при нагрузках 9,6; 9,7 и 10,1 кН соответственно, что в целом не превысило 6 % от среднеарифметической величины. Кроме этого полученные результаты хорошо коррелируются с результатами ранее проведенных исследований [12]. Отметим, что в других сериях отклонения значений разрушающих нагрузок от среднеарифметической величины, полученной по результатам испытаний пяти идентичных образцов, не превышали величины 8 %, что подтверждает как качество изготовления образцов, так и объективность полученных результатов. Все пять испытанных образцов разрушились хрупко от скальвания по слою «клей–металл». При этом целостность как самой kleевой прослойки в выбранном в древесине пазе, так и слоя «клей–древесина» не была нарушена. Этот факт свидетельствует о недостаточной степени адгезии kleевого состава с металлом для пластин с необработанной гладкой поверхностью.

Во второй серии с нанесенными на поверхность пластин прямыми пазами, перпендикулярными продольной оси пластины (наиболее простой способ обработки с технологической точки зрения), средняя разрушающая нагрузка составила 19,7 кН (рис. 6), что в 2,01 раза превысило несущую способность соединений на основе пластин с гладкой поверхностью. Все пять испытанных образцов разрушились хрупко. При этом два образца разрушились от скальвания kleевой прослойки по всей поверхности пластины – образец С2-ПП/1 по слою «клей–древесина», а образец С2-ПП/4 по слою «клей–металл». Три образца (С2-ПП/2, С2-ПП/3, С2-ПП/5) имели смешанный характер разрушения – от отрыва kleевой прослойки от пластины у торца деревянного бруса (на участке длиной ≈ 70 мм) и от скальвания слоя

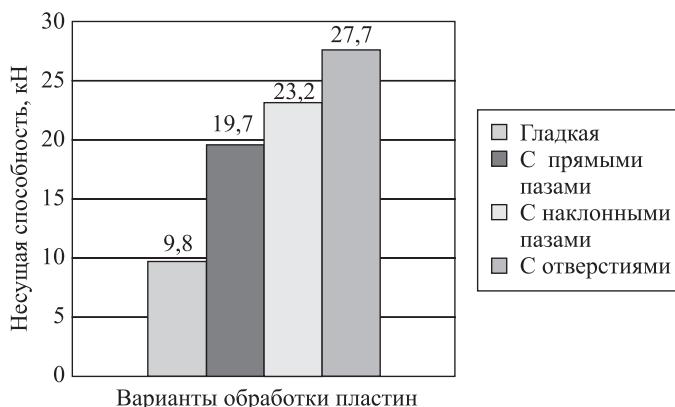


Рис. 6. Диаграмма зависимости несущей способности соединений от способа обработки пластин

«клей–древесина» на остальной длине вклеенной части пластины. Анализ характера разрушения соединений с применением пластин с выбранными на поверхности пазами, перпендикулярными их продольной оси, позволил констатировать, что дополнительная обработка поверхностей пластин в виде прямых пазов улучшает адгезию по слою «клей–металл», существенно повышает несущую способность соединения. При этом фактическая степень адгезии является недостаточной, так как она не исключает возможности разрушения от скальвания шва «клей–металл». Также прямые пазы не позволяют воспринимать нормальные отрывные напряжения, что и послужило причиной разрушения трех из пяти образцов.

Все образцы серии 3 с наклонными пазами разрушились хрупко, практически по одной схеме, в результате скальвания древесины по слою «клей–древесина» у торца деревянного бруса (на участке длиной ≈ 100 мм) и от скальвания слоя «клей–металл» на остальной длине вклеенной части пластины. Толщина выколотившегося слоя древесины колебалась от 4 мм (непосредственно у торца) и до 1 мм (на расстоянии 100 мм от торца бруса), что свидетельствует о наличии в зоне торца деревянного образца раскалывающих напряжений. После скальвания на пластине оставалась kleевая обойма с волокнами древесины. Разрушению от скальвания предшествовали значительный рост деформаций (до 0,8 мм) и наличие потрескивания. На первом этапе разрушения происходило раскалывание древесины в приторцевой зоне вклейки пластины с дальнейшим распространением скальвания вглубь. На последующем этапе происходил резкий вырыв пластины из массива древесины. Средняя разрушающая нагрузка составила 23,2 кН (рис. 6), что на 17,8 % больше несущей способности соединений серии 2. Полученные результаты показали, что устройство в пластинах наклонных пазов позволяет еще в большей степени увеличить адгезию kleевой прослойки к металлу и, как следствие, несущую способность соединения. Однако такой способ дополнительной обработки поверхностей пластин, как и в случае прямых пазов, не позволяет воспринимать нормальные отрывные напряжения, что и ограничивает прочность соединения в целом.

Принципиально другая картина разрушения наблюдалась у образцов серии 4. После приложения нагрузки в 24,5 кН начало издаваться периодическое характерное потрескивание образца, а на диаграмме испытания «нагрузка–деформации» угол наклона прямой к горизонтальной оси деформаций образца начал уменьшаться, что свидетельствовало о начале пластической стадии деформирования образца, который в итоге разрушился хрупко при нагрузке в 27,7 кН. В одной из частей образца разрушение произошло по контакту «клей–металл», а вторая часть образца разрушилась от скола древесины вдоль волокон по плоскости бруса, отстоящей от поверхности kleевой композиции на 1–2 мм. Обработка поверхностей разрушения образца и последующие обмеры показали, что вклеенная часть стальных плоских стержней пластически деформировалась с остаточным удлинением в 1,4 %. Два ближайших к торцу образца отверстия деформировались с образованием характерных шеек в ослабленных сечениях и приобрели овальную форму. Цилиндрическая kleевая шпонка, образованная kleевой композицией в отверстиях стержня, с торцами, приклейными к внутренним поверхностям

паза в деревянном брусе, была разрушена по плоскостям поверхностей стержня с повреждениями в виде выколов клея в первом отверстии от изменения формы отверстия в овальное.

Анализ процесса испытания и характера разрушения образца позволил сделать следующие выводы:

– после нагрузки в 24,5 кН напряжения в сечениях стального стержня, ослабленных первым от торца образца отверстием, достигли предела текучести стали;

– в этот момент наряду с работой стержня в упругопластической области в работу в полной мере включилась kleевая шпонка, воспринимающая как касательные к поверхности стержня напряжения среза, так и нормальные к поверхности стержня напряжения, растягивающие шпонку;

– продолжающиеся пластические деформации стержня с превращением круглого отверстия в овальное периодически разрушали kleевую шпонку и уменьшали площадь вклейивания за счет образования трещин по контакту «клей–металл»;

– критическое накопление повреждений в kleевом соединении привело к хрупкому разрушению с мгновенным высвобождением накопленной энергии.

Отметим, что все пять испытанных образцов разрушились идентично, при этом разрушающая нагрузка находилась в интервале от 26,6 до 28,8 кН.

Говоря о деформациях предложенного способа соединения деревянных элементов, отметим, что величина смещения невклеенной части пластины относительно торца деревянного элемента, в независимости от типа обработки поверхностей пластин, при разрушающей нагрузке находилась в интервале 0,35–0,39 мм. Этот факт говорит о том, что соединения на вклеенных пластинах можно отнести к жестким типам соединений.

Результаты проведенных исследований в целом показали, что способ обработки поверхностей вклеенных в древесину пластин существенно влияет на несущую способность соединения. С учетом ранее проведенных исследований [10], выявивших зависимость несущей способности рассматриваемого класса соединений от таких факторов, как длина, ширина и толщина вклеенной части пластины, а также от неравномерного распределения напряжений по ее длине, для определения расчетной несущей способности соединений деревянных элементов на вклеенных пластинах можно рекомендовать следующую формулу (с учетом рекомендаций [10]):

$$T \leq R_{ck} \cdot k_{ob} \cdot b \cdot l \cdot k_t \cdot k_l, \quad (1)$$

где R_{ck} – расчетное сопротивление скальванию стандартной вклеенной пластины с необработанной (гладкой) поверхностью по шву «клей–металл», МПа; k_{ob} – коэффициент, учитывающий способ обработки поверхности вклеиваемой в древесину части пластины;

b – ширина вклеиваемой пластины, м, в диапазоне от 0,04 до 0,1 м;

l – длина вклеенной части пластины, м, которую следует принимать по расчету, но не менее $2b$ и не более $8b$;

k_t – корректировочный коэффициент, учитывающий влияние толщины пластины на прочность соединения;

k_l – коэффициент, вводимый к площади пластины при определении ее несущей способности и учитывающий степень неравномерного распределения напряжений.

В предлагаемой формуле (1), с учетом отсутствия данных в нормативных документах, R_{ck} необходимо определять путем проведения серии испытаний с последующей статистической обработкой полученных результатов соединений деревянного бруса со стандартной вклеенной пластиной со следующими параметрами: ширина $b = 40$ мм, толщина $\delta = 4$ мм, длина вклеиваемой части $l_{vk} = 80$ мм или $l_{vk} = 2b$. Все перечисленные параметры определены как минимальные из рекомендуемых, что позволяет адекватно аппроксимировать корректировочные коэффициенты, приведенные в формуле (1).

Коэффициент k_{ob} необходимо определять экспериментальным путем испытания соответствующих образцов с определенным типом обработки поверхности. При этом параметры обработки вклеиваемой части пластины должны быть четко оговорены в технологической карте (диаметр отверстий или ширина пазов, их шаг, расстановка по ширине и т.п.). Например, в первом приближении с учетом полученных результатов значение коэффициента k_{ob} при выполнении отверстий в вклеиваемой части пластины в соответствии с рис. 4 будет равно $k_{ob} = 27,7/9,8 = 2,8$. При разработке нормативной методики расчета рекомендуется исследовать и все корректировочные коэффициенты при принятом способе обработки поверхности пластин.

Отметим, что предложенными в настоящей статье способами обработки поверхностей пластин в их kleевых соединениях с деревянными элементами не исчерпываются все технические и технологические возможности этого нового класса соединений. Авторы статьи надеются, что приведенные материалы дадут импульс исследователям в области деревянных конструкций к развитию нового направления в строительных конструкциях.

Выводы. 1. Проведенные численные и экспериментальные исследования подтвердили техническую целесообразность применения в соединениях деревянных конструкций стальных вклеенных пластин.

2. Установлены существенная зависимость несущей способности и характер разрушения рассматриваемого класса соединений от способа обработки поверхности пластин.

3. Устройство во вклеиваемой части пластин сквозных отверстий позволяет повысить несущую способность соединения в сравнении с ранее предложенными способами обработки поверхности пластин, в том числе за счет работы kleевой композиции в отверстиях аналогично шпонкам, воспринимающим нормальные отрывные напряжения.

4. Предложенная формула для расчета соединений на стальных вклеенных пластинах позволяет учесть способ и параметры обработки их поверхностей. Однако для внедрения предложенного способа расчета в нормативную документацию необходимо проведение серии комплексных экспериментально-теоретических исследований натурных узлов деревянных конструкций, которые позволят разработать технически обоснованную методику расчета предлагаемого класса узловых сопряжений деревянных конструкций, в том числе с определением наиболее оптимальных диаметров вы сверливаемых отверстий и шага их расположения по длине вклеиваемой части пластины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вдовин В.М., Ишмазова Д.Д. Экспериментальные исследования жестких узлов балочных структур из клееных деревянных элементов // Региональная архитектура и строительство. 2014. № 2. С. 130–137.
2. Орлович Р.Б., Гиль З., Дмитриев П.А. Тенденции в развитии соединений деревянных конструкций в строительстве за рубежом // Изв. вузов. Строительство. 2004. № 11. С. 4–9.
3. Zofia Gil. Zbrojenie elementów drewinianych za pomocą prętów spiralnych. VII Konferencja Naukowa // Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin, 2006. Р. 89–96.
4. Gustafsson P.J., Serrano E. Predicting the pull-out strength of glued-in rods // Proceedings of World Conference on Timber Engineering, Whistler Resort, Canada, July-August 2000.
5. Турковский С.Б., Погорельцев А.А. Создание деревянных конструкций системы ЦНИИСК на основе наклонно вклеенных стержней // Пром. и гражд. стр-во. 2007. № 3. С. 6–8.
6. Турковский С.Б., Погорельцев А.А., Преображенская И.П. Клеевые деревянные конструкции с узлами на вклеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК). М.: РИФ «Стройматериалы», 2013. 308 с.
7. Рощина С.И. Армирование – способ повышения надежности и долговечности деревянных конструкций // Изв. вузов. Лесн. журн. 2008. № 2. С. 71–75.
8. Жаданов В.И., Руднев И.В., Дмитриев П.А. К вопросу применения вклеенных металлических пластин в соединениях деревянных конструкций // Строительная наука-2014: теория, образование, практика, инновации: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. Архангельск: ООО «Типография «Точка», 2014. С. 309–314.
9. Руднев И.В., Жаданов В.И. Выдергивание стальных пластин, вклеенных в древесину. Аналитический расчет и эксперимент // Вестн. Чуваш. гос. пед. ун-та им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. Чебоксары, 2015. № 3. С. 9–18.
10. Руднев И.В., Жаданов В.И. Методика расчета соединений элементов деревянных конструкций на стальных вклеенных пластинах // Вестн. Оренбург. гос. ун-та. 2015. № 5. С. 182–191.

Лисицкий Иван Иванович, асп.; E-mail: organ-2003@bk.ru/.

Оренбургский государственный университет

Жаданов Виктор Иванович, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: organ-2003@bk.ru/.

Оренбургский государственный университет

Руднев Игорь Владимирович, канд. техн. наук, доц.;

E-mail: organ-2003@bk.ru/.

Оренбургский государственный университет

Украинченко Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, доц.;

E-mail: organ-2003@bk.ru/.

Оренбургский государственный университет

Получено 15.04.18

Lisitskiy Ivan Ivanovich, Post-graduate Student; E-mail: organ-2003@bk.ru/.

Orenburg State University, Russia

Zhadanov Viktor Ivanovich, DSc, Professor; E-mail: organ-2003@bk.ru/

Orenburg State University, Russia

Rudnev Igor' Vladimirovich, PhD, Ass. Professor; E-mail: organ-2003@bk.ru/.
Orenburg State University, Russia
Ukrainchenko Dmitriy Aleksandrovich, PhD, Ass. Professor;
E-mail: organ-2003@bk.ru/.
Orenburg State University, Russia

WAYS OF INCREASE OF THE BEARING CAPACITY OF WOODEN DESIGNS' CONNECTIONS ON STEEL PASTED PLATES

Increase of durability, rigidity and reliability of wooden designs is inseparably connected with questions of their nodal interfaces improvement. Application of new types of connecting details is the most effective way of achievement of the quantum leap in extension of the nomenclature of designs on the basis of wood and increase in their competitiveness in the construction market. The paper explores questions of application of steel pasted plates in connections of wooden designs. The article shows the wide field of their possible use. It is noted that so far in standard literature there is no justification the method of calculation of the considered class of connections considering its features. The article explores constructive solutions of joints of the bearing wooden designs with the pasted plates and also results of experiments and numerical calculations on the intense deformed condition of elements of the developed connections by a finite element method. It is revealed that the bearing ability of connection changes depending on the way of processing of a plates surface. In Article proposes the empirical formula for determination of the bearing ability of the considered class of connections convenient for practical engineering calculations.

K e y w o r d s: wooden designs, joints, connection, the pasted steel plate, surface, processing, opening, bearing capacity.

REFERENCES

1. V do v i n V.M., I sh m a e v a D.D. Eksperimental'nye issledovaniya zhestkikh uzlov balochnykh struktur iz kleenykh derevyannykh elementov [Experimental researches of rigid joints of beam structures made of glued wooden elements]. Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo [Regional architecture and construction engineering]. 2014. No. 2. Pp. 130–137. (in Russian)
2. Orl o v i ch R.B., Gil' Z., D mit rie v P.A. Tendentsii v razvitii soedineniy derevyannykh konstruktsiy v stroitel'stve za rubezhom [Tendencies in development of connections of wooden designs in construction engineering abroad]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2004. No. 11. Pp. 4–9. (in Russian)
3. Zofia Gil. Zbrojenie elementów drewnianych za pomocą prętów spiralnych. VII Konferencja Naukowa. Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin, 2006. Pp. 89–96.
4. G u s t a f s s o n P.J., Serrano E. Predicting the pull-out strength of glued-in rods. Proceedings of World Conference on Timber Engineering, Whistler Resort, Canada, 2000.
5. T u r k o v s k i y S.B., Pogorel'tsev A.A. Sozdanie derevyannykh konstruktsiy sistemy TSNIISK na osnove naklonno vkleennykh sterzhney [Creation of wooden designs of the TsNIISK system' on the basis of inclined pasted cores]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and civil engineering]. 2007. No. 3. Pp. 6–8. (in Russian)

6. Turkovskiy S.B., Pogoreltsev A.A., Preobrazhenskaya I.P. Kleenye derevyannykh konstruktsii s uzlami na vkleennykh sterzhnyakh v sovremennom stroitel'stve (sistema TSNIISK) [Glued wooden designs with joints on the pasted cores in modern construction engineering (TSNIISK system)]. Moscow, RIF «Stroymaterialy», 2013. 308 p. (in Russian)
 7. Roshchina S.I. Armirovanie – sposob povysheniya nadezhnosti i dolgovechnosti derevyannykh konstruktsiy [Reinforcing – a way of increase of reliability and durability of wooden designs]. Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal [The Bulletin of Higher Educational Institutions. Forestry journal]. 2008. No. 2. Pp. 71–75. (in Russian)
 8. Zhdanov V.I., Rudnev I.V., Dmitriev P.A. K voprosu primeneniya vkleennykh metallicheskikh plastin v soedineniyakh derevyannykh konstruktsiy [On a question of application of the pasted metal plates in connections of wooden designs]. Stroitel'naya nauka-2014: teoriya, obrazovanie, praktika, innovatsii: sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii [Construction science-2014: theory, education, practice, innovations: collection of works of the International scientific and technical conference]. Arkhangelsk, 2014. Pp. 309–314. (in Russian)
 9. Rudnev I.V., Zhdanov V.I. Vydergivanie stal'nykh plastin, vkleennykh v drevesinu. Analiticheskiy raschet i eksperiment [Wrest of the steel plates pasted in wood. Analytical calculation and experiment]. Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.Ya. Yakovleva. Seriya: Mekhanika predel'nogo sostoyaniya [Bulletin of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State]. 2015. No. 3. Pp. 9–18. (in Russian)
 10. Rudnev I.V., Zhdanov V.I. Metodika rascheta soedineniy elementov derevyannykh konstruktsiy na stal'nykh vkleennykh plastinakh [Method of calculation of connections of wooden designs elements on the steel pasted plates]. Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Orenburg State University]. 2015. No. 5. Pp. 182–191. (in Russian)
-

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ



УДК 691.32.001

О.В. АРТАМОНОВА, Е.М. ЧЕРНЫШОВ

К ПРОБЛЕМЕ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ЭВОЛЮЦИОННЫМ МАРШРУТОМ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ СИСТЕМ ТВЕРДЕНИЯ В СТРУКТУРЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ

Обсуждается проблема управления процессом формированияnanoструктуры неорганических систем твердения строительных композитов. В качестве базовых анализируются концептуальные модели стадий конденсационного процесса зарождения фазы, роста частиц, агломерации, самопроизвольного структурообразования в эволюционном маршруте формирования твердой фазы систем твердения. При этом выделяются факторы управления кинетическими характеристиками реализации стадий конденсационного процесса, предлагается система средств, образующих арсенал «нано» для технологии наномодификации неорганических систем твердения гидратационно-синтезного, гидротермально-синтезного, термально-синтезного типов, применяемых при получении структур строительных композитов. Показывается практическое значение выполненных исследований для технологии материалов по критериям энергоэффективности процесса структурообразования системы твердения цемента (E), длительности его протекания и завершения (τ), достигаемого уровня качества материала по его конструкционным и функциональным характеристикам (R).

Ключевые слова: структура строительных композитов, неорганические системы твердения, эволюционный маршрут конденсации, концептуальные модели структурообразования, наномодификация систем твердения, факторы управления наномодификацией.

Введение. Цели и задачи публикации. Контекст прикладной задачи управления формированием структуры и свойствами цементного камня в условиях применения нанохимического подхода и использования средств из арсенала «нано» [1] предопределяет обоснованность обращения к следующим пояснениям и посылкам.

Прежде всего, поясним название статьи, ключевым словосочетанием в которой является «наномодифицированные системы твердения в структуре строительных композитов».

Это словосочетание отражает авторский взгляд [2] на композит, в частности на цементный бетон, как на *структурированный объем*, состоящий из

© Артамонова О.В., Чернышов Е.М., 2018

«системы сложения» зернистых частиц, образующих каркас материала, и «системы роста», являющейся результатом гидратации цемента и соответственно формирования системы твердения, омонологичивающей данный каркас (рис. 1).

Неорганические системы твердения (гидратационно-синтезные, гидротермально-синтезные, термально-синтезные) в структуре строительных композитов могут быть объектом наномодифицирования, что сегодня в материаловедении и технологии бетонов является актуальным предметом специальных исследований и разработок [3–5].

Необходимо подчеркнуть, что в строении конгломератных строительных материалов как объектов исследования следует выделять два типа структур по признаку их происхождения (генезису): первый из них, относящийся к макро-, мезо- и микроструктуре, является следствием сложения готовых зернистых частиц («система сложения»); второй, относящийся к микро-, субмикро- и наноструктуре, оказывается результатом синтеза частиц в эволюционном маршруте их образования («система роста»).

Генезис первого типа структуры осуществляется по концепциям и основаниям механики зернистых сред; при этом одновременно может реализовываться нанотехнологический принцип «сверху–вниз» с соответствующими наномодифицирующими эффектами, относящимися к проблематике механохимии диспергируемых исходных сырьевых материалов.

Генезис второго типа структуры осуществляется по концепциям и основаниям механизмов конденсации, которые развиваются в рамках действия нанотехнологического принципа «снизу–вверх», предопределяющего



Рис. 1. Общая схема формирования структуры строительных композитов с позиций нанотехнологического подхода

эффекты наномодифицирования в эволюционном маршруте формирования систем твердения в композитах.

Ключевое словосочетание «наномодифицирование в эволюционном маршруте формирования систем твердения», оказываясь составной частью названия статьи, определяет ее сущность и цель.

Сущность и цель статьи заключается в комплексном системном рассмотрении концептуальных моделей, на которые может опираться управление развитием эволюционного маршрута, поскольку именно это и составляет главный момент обоснования и разработки технологии наномодифицирования неорганических систем твердения в структуре строительных композитов.

Принципиально указать, что оба вышеназванных типа структур в композите и их генезис в нанотехнологиях получения строительных композитов интегрированы. На этой основе объединяются «управляющие возможности» принципов «сверху–вниз» и «снизу–вверх», образуя так называемый арсенал «нано».

С практической точки зрения параметры развития и результат эволюционного маршрута являются функцией рецептурно-технологических факторов (РТФ) принципа «сверху–вниз» ($\text{РТФ}_{\text{св–вн}}$) и принципа «снизу – вверх» ($\text{РТФ}_{\text{чн–вв}}$).

Укажем, что наномодифицирование необходимо рассматривать одновременно как «действие», как «процесс» и как «результат». При этом «действие» выбирается из арсенала «нано» $\text{РТФ}_{\text{св–вн}}$ и $\text{РТФ}_{\text{чн–вв}}$ в предположении и стремлении организовать «процесс» гидратации цемента и структурообразования цементного камня с учетом желаемого «результата», оцениваемого по критериям эффективности наномодифицирования. Такими критериями принимаются энергоэффективность процесса структурообразования системы твердения цемента E , длительность его протекания и завершения τ , достигаемый уровень качества материала по его конструкционным и функциональным характеристикам R [1, 6].

Относительно R необходимо специально дать следующие пояснения: R является функцией количества синтезированной за время τ в эволюционном маршруте новой фазы и одновременно функцией ее качества по химико-минералогическим, морфологическим, дисперсным, пространственно-геометрическим характеристикам и параметрам. Действительно, упруговязкопластические показатели механического поведения композитов, их температурно-влажностная деформируемость, стойкость в условиях воздействия факторов эксплуатационной среды и пр. непосредственно, причинно-следственным образом, связаны с составом, структурой и состоянием получаемой системы твердения.

И количественные, и качественные характеристики и параметры структуры формирующейся системы твердения, являясь функцией присущих технологий ее РТФ, одновременно могут быть результатом и следствием целенаправленного действия нанотехнологических приемов.

Все это, включая последнее, имеет отношение к проблеме фундаментального научного знания и соответствующих этим знаниям концептуальных моделей, на которые необходимо и требуется, как уже отмечалось, опираться при обосновании решений в технологиях наномодифицирования неорганических систем твердения в структуре строительных композитов.

Эволюционный маршрут формирования «системы роста» и образование системы твердения в структуре строительных композитов. Эволюция «системы роста», образование «системы твердения» в реальной гетерогенной системе в самой обобщенной постановке – это совокупность параллельных и последовательных явлений и процессов конденсации твердой фазы. В зависимости от условий конденсация в целом может развиваться по отличающимся во времени маршрутам, но в общем случае все типичные стадии и переходы присутствуют. Любой отдельный конденсационный процесс можно рассматривать как разновидность общего вида эволюционного маршрута (рис. 2), и в нем эволюцию твердой фазы вещества можно определить как последовательность стадий зарождения, роста и накопления новой фазы, упорядочения структуры и состава первичных частиц посредством их агломерации и компактирования в агрегаты, созревания и перекристаллизации, самопроизвольного и самоорганизующегося структурообразования [7].

Технология наномодифицирования должна быть нацелена на эти стадии и процессы с условием получения структур кристаллитов, кристаллов, их

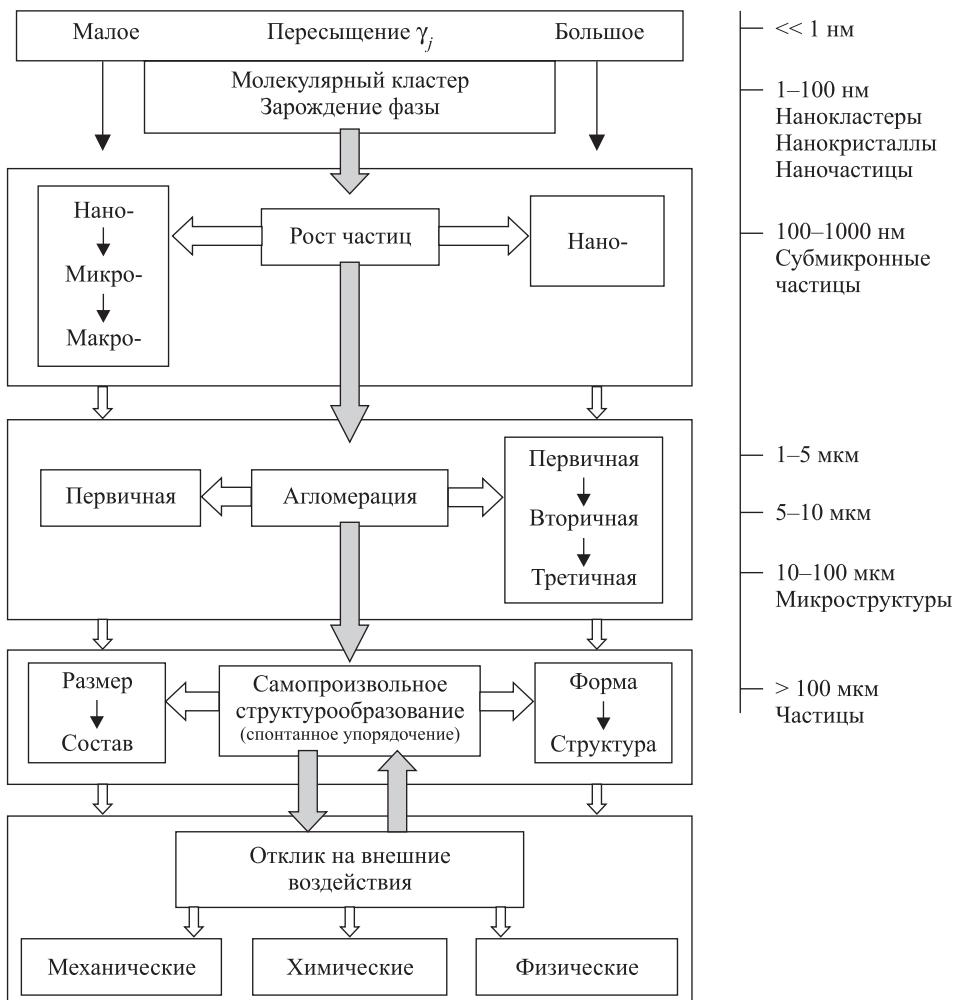


Рис. 2. Эволюционный маршрут формирования «системы роста»

агломератов и кристаллического сростка, т.е. в целом, в итоге цементирующего вещества, системы твердения соответственно критериям эффективности $E_{\text{нт}}$, τ , \bar{R} .

Базовые концептуальные модели эволюционного маршрута и возможности управления процессом наномодифицирования систем твердения. Рассмотрим последовательно возможные способы нанотехнологического воздействия на стадии и переходы маршрута с позиции их кинетики. Для этого воспользуемся соответствующими концептуальными моделями, отражающими существование и возможности управления развитием эволюционных стадий и переходов.

На первой стадии – стадии процесса зарождения частиц твердого вещества применение нанотехнологических управляющих воздействий может мотивироваться стремлением ускорить процесс накопления новообразований, энергетически «облегчить» его и тем самым повысить эффективность технологии по критериям τ и $E_{\text{нт}}$; но одновременно в системе необходимо структурно дифференцировать объем накапливающейся твердой фазы, имея в виду и возможности формирования первичных частиц с управляемыми кристаллохимическими и геометрическими характеристиками.

Для обоснования факторов управления развитием стадии обратимся к анализу формализующих причинно-следственных отношений – концептуальных моделей кинетики процесса. Процесс следует рассматривать в рамках кинетической теории формирования новой фазы, а поэтому с точки зрения факторов управления соотносить его с температурой кристаллизации (T); удельной поверхностной свободной энергией кристаллов (σ); молярным объемом новой фазы (V_m); степенью пересыщения (γ), которая входит в соотношение

$$\Delta\mu = RT\ln(\gamma + 1); \quad (1)$$

энергией активации перехода ионов, молекул из среды в центры кристаллизации ($E_{\text{акт}}$); интенсивностью вторичного зародышеобразования в объеме начальной фазы ($I_{\text{вт}}$), которая связана с возможными дополнительно внесенными извне центрами кристаллизации, например, наноразмерными частицами добавок.

В соответствии с теорией Гиббса–Фольмера [8] образование зародыша критического размера (r_{kp}) моделируется уравнением полной энергии кристаллизации ΔG_{kp} :

$$\Delta G_{\text{kp}} = \frac{16\pi\sigma^3 V_m^2}{3R^2 T^2 (\ln\gamma_{\text{kp}})^2}; \quad (2)$$

$$r_{\text{kp}} = \frac{2\sigma V_m C_1}{T(C - C_1)}, \quad (3)$$

где C – концентрация пересыщенного раствора; C_1 – концентрация насыщенного раствора.

Появление зародышей становится возможным при достижении определенной (критической) степени пересыщения раствора тем веществом, молеку-

лы которого участвуют в образовании новой фазы. Простейшее соотношение, характеризующее пересыщение, имеет вид

$$\gamma = (C_m / L_{mj}) - 1, \quad (4)$$

где γ – степень пересыщения;

C_m – количество молекул или кластеров, из которых строятся частицы, в единице объема среды;

L_{mj} – рубежное значение C_m для данной частицы.

Общее число центров кристаллизации (I_u), возникающих в единице объема раствора (расплава), или суммарная интенсивность их первичного и вторичного образования, зависит от кинетического коэффициента этого процесса (α).

$$I_u = \alpha \cdot \exp \left[-\frac{1}{RT} \left(\frac{16\pi\sigma^3 V_m^2}{3(\Delta\mu)^2} + E_{акт} \right) \right] + I_{вт}. \quad (5)$$

Таким образом, основным средством управления на этой стадии является степень пересыщения исходного раствора, влияющая на скорость появления и параметры структуры зародыша кристалла. В нанотехнологиях с учетом этого следует обратиться к способам регулирования состояния пересыщения, во-первых, к введению в систему наночастиц с родственным кристаллохимическим строением (для изменения C_m) и (или), во-вторых, к регулированию растворимости исходных компонентов посредством тепловых или иных (физических) воздействий на систему (для изменения L_m).

Относительно первого дополнительно отметим, что химическое средство (минералогическое и размерное) вводимых нанодобавок как возможных центров зародышеобразования частиц твердой фазы имеет решающее значение для молекулярного отбора в системе, т.е. для интенсификации первого перехода в маршруте эволюции твердого вещества «зарождение фазы»–«рост частиц». На фоне уменьшения внутренней энергии системы действует явление молекулярного (ионного) отбора [8], в результате которого зародышами становятся кластеры молекул (ионов), содержащие, прежде всего, сходные по структуре и размерам молекулы (ионы). В такой трактовке механизм наномодифицирующего влияния добавок на уровне процессов формирования отдельного кристалла оказывается связан с возможностью непосредственно химического участия наноразмерных частиц в гетерогенных процессах фазообразования гидратных соединений, что обеспечивает ускорение развития молекулярного кластера зародыша частицы. А такая возможность определяется как субстанциональным признаком, т.е. химико-минералогическим составом вводимых наночастиц, так и геометрическим признаком, т.е. повышенными значениями удельной площади их поверхности, от чего зависит их удельная поверхностная энергия.

Отсюда именно и становится ясным вопрос о том, по каким признакам необходимо характеризовать и выбирать добавки для технологии наномодификации [9].

На второй стадии – стадии процесса роста частиц и накопления твердого вещества развитие кристаллов после их зародышеобразования реализуется как гетерогенный процесс, происходящий при уже сформированной границе раздела между исходной и новой фазами. На этой стадии морфология

системы непрерывно изменяется вследствие закономерного развития явления топологического отбора, в ходе которого среда разрушает и устраниет неупорядоченные формы и способствует образованию упорядоченных форм, состоящих из частиц с близкими геометрическими параметрами.

Саморазвитие процесса определяется мерой отклонения системы от состояния термодинамического равновесия. Именно это выступает в качестве его движущей силы, приводя к перераспределению компонентов между питающей средой и растущим кристаллом. Последнее в конечном итоге становится фактором увеличения размера и изменения формы кристалла. На данной стадии посредством и вследствие наномодифицирования могут быть изменены такие параметры структуры, как коэффициент формы кристалла, количество вероятных точечных дефектов в единице объема кристалла.

Рассмотрение основных концептуальных моделей (в количественной постановке вопроса) основывается для этой стадии на допущении, что после появления в момент времени $t = 0$ в объеме V_0 центра кристаллизации рост новой фазы происходит изотропно с постоянной линейной скоростью v . Тогда к моменту времени $t = \tau$ объем, который будет занимать новая фаза, окажется равным

$$V(t) = \frac{4\pi}{3} v^3 \tau^3. \quad (6)$$

Число центров кристаллизации, появляющихся в системе за время от τ до $\tau + d\tau$ при постоянстве скорости зарождения центров в единице объема, равно $J[V_0 - V(\tau)]d\tau$. К моменту времени $t > \tau$ общее приращение объема новой фазы только за счет центров, возникших в интервале времени от τ до $\tau + d\tau$, составит величину dV . При этом концептуальная модель процесса роста частиц имеет вид

$$\frac{V(t)}{V_0} = 1 - \exp\left[-\frac{\pi}{3} J v t^4\right], \quad (7)$$

чему соответствует характерная сигмоидная кривая скорости накопления твердой фазы. Подвод вещества к растущему надкритическому зародышу осуществляется за счет диффузии (D) из окружающего раствора. Скорость роста зародыша (v) будет равна скорости увеличения его радиуса за счет молекул, осаждающихся на сферической поверхности зародыша:

$$v = \frac{dr}{dt} = \frac{DV}{a^2}(r - r_{kp})(C - C_1), \quad (8)$$

где D — диффузия молекул из раствора;

V — объем вещества в конденсированном состоянии;

a — средний радиус частиц;

r — радиус зародыша;

r_{kp} — критический радиус кристаллического зародыша;

C — концентрация пересыщенного раствора;

C_1 — концентрация насыщенного раствора.

Общее приращение объема новой фазы

$$dV = \frac{4\pi J}{3} [V_0 - V(\tau)] v^3 (t - \tau)^3 d\tau. \quad (9)$$

Структурообразующее участие и модифицирующее влияние добавок наноразмерных модификаторов на стадии роста и накопления частиц связано в том числе и с каталитической ролью наноразмерных частиц как центров кристаллизации с соответствующим эффектом понижения энергетического порога этого процесса и ускорения его. Следует считать, что основным фактором управления на данной стадии является создание дополнительных центров кристаллизации, а это обеспечивается введением обоснованной дозы наноразмерных добавок оптимального размера и подходящей кристаллохимической структуры.

Дополнительно и уместно здесь указать, что для формирования необходимого размерного габитуса кристаллов целесообразно вводить определенные поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые могут избирательно блокировать рост отдельных их граней, тем самым влияя на их геометрию и способствуя образованию, например, длинномерных морфологических разностей, предопределяющих проявление в последующем эффектов самомикроармирования и упрочнения структуры цементирующего вещества.

В эволюционном маршруте объективно наступает второй переход «рост частиц»—«агломерация», в результате чего система твердой фазы структурируется на уровне кристаллического сростка.

На третьей стадии – стадии процесса агломерации индивидуальных частиц твердой фазы имеет место пространственная их группировка посредством адгезии, в результате которой формируются более крупные по размерам «вторичные» частицы. Агломерация происходит путем связывания первичных частиц за счет слабых (приводящих к образованию агрегатов) или более сильных (приводящих к образованию агломератов) взаимодействий. При этом первичные частицы в агломерате и агрегате в значительной степени сохраняют свою первичную форму и размер. Именно последнее отличает агломерацию от перекристаллизации, когда рост больших частиц осуществляется за счет поглощения более мелких, т.е. с изменением их формы и размера.

Стоит отметить, что при достижении момента предельного накопления твердого вещества процесс агломерации может продолжаться и протекать параллельно с процессами агрегации и перекристаллизации. В последнем случае, если перекристаллизация проходит в разбавленной системе разобщенных кристаллов, т.е. касается раздельно развивающихся кристаллов, имеет место растворение малоразмерных их разновидностей и разрастание за их счет крупноразмерных; если же перекристаллизация идет в концентрированной (в смысле числа кристаллов в единичном объеме) системе, то такая перекристаллизация совмещается с явлением агломерации и агрегирования частиц, приводящим к формированию кристаллитной структуры с определенным зонированием объема образующейся твердой фазы.

В управляемой агломерации объектом наномодификации является, таким образом, поликристаллический агломерат (агрегат), сросток с получением их характеристик и параметров соответственно целям, определяемым положениями структурной механики свойств материалов. Остановимся на основных концептуальных моделях для рассматриваемой стадии. Движущей силой процесса агломерации является стремление системы к уменьшению

площади границ раздела фаз. Внешняя площадь поверхности вторичной частицы равна [10]

$$S'_{\text{агр}} = \pi \eta_f (D_0 - d_0)^2, \quad (10)$$

где η_f – плотность упаковки частиц в агрегате, D_0 – линейный размер агрегата, d_0 – диаметра наночастицы.

На этой поверхности агрегата располагаются первичные частицы в количестве

$$N'_0 = S'_{\text{агр}} / \bar{s}_0 = 4 \eta_f \left(\frac{D_0}{d_0} - 1 \right)^2, \quad (11)$$

где $\bar{s}_0 = \pi d_0^2 / 4$ – проекция одной частицы на поверхность.

Отсюда можно перейти к соотношению для удельной площади поверхности агрегата ($S_{\text{уд}}$), контактирующей с жидкой фазой:

$$S_{\text{уд}} = \frac{1}{2} \pi d_0^2 N'_0 = 2 \pi \eta_f (D_0 - d_0)^2. \quad (12)$$

Соотношение учитывает зависимость $S_{\text{уд}}$ от линейного размера агрегата (D_0), диаметра наночастицы (d_0), плотности упаковки частиц в агрегате (η_f).

Основываясь на этом, можно определить количество частиц, входящих в агрегат (N_k), и изменение общей площади границы раздела фаз (ΔS):

$$N_k = \eta_f \left(\frac{D_0}{d_0} \right)^3, \quad (13)$$

$$\Delta S = \eta_f \left(\frac{D_0}{d_0} \right)^3 \pi d_0^2 - 2 \pi \eta_f (D_0 - d_0)^2 = \pi \eta_f d_0^2 \left[\left(\frac{D_0}{d_0} \right)^3 - 2 \left(\frac{D_0}{d_0} - 1 \right) \right]. \quad (14)$$

С уменьшением размера исходных частиц зародыша при наномодифицировании увеличивается количество выделяющейся энергии, что способствует интенсификации агломерации и сокращению продолжительности процесса. Процесс агломерации протекает в жидкой фазе растворителя (например, воды), в которой присутствуют первичные частицы в определенном количестве. При этом структура растворителя (например, фрактальная сетка воды) может задавать некую структуру при образовании вторичных частиц, агрегатов, агломератов; причем это будет непосредственно связано с энергетическими эффектами при агломерации. Энергия, высвобождающаяся при агломерации агрегата ($E_{\text{агл}}$), может складываться из энергии E_k , необходимой для преодоления сил сцепления между агломератами, энергетических затрат на смачивание образовавшейся поверхности агломерата E_s и преодоления сил сопротивления среды при перемещении агломерата E_c :

$$E_{\text{агл}} = E_k + E_c - E_s. \quad (15)$$

К основному фактору наномодифицирования на данной третьей стадии, таким образом, следует отнести специальное формирование фрактальной структурной сетки растворителя (жидкой фазы), поскольку это обуславливает изменение типа (механизма) физико-химической адсорбции на границе

раздела фаз [11]. Следствием этого оказывается изменение критерия времени τ и энергоемкости технологии $E_{\text{нт}}$.

Формирование указанной фрактальной сетки может быть достигнуто, например, введением наноразмерных и ультрадисперсных углеродосодержащих частиц, которые изначально физико-химически взаимодействуют с жидкой средой (например, водой затворения), формируют упорядоченную «каркасную» ее структуру за счет водородных связей и ван-дер-ваальсовых взаимодействий. Именно полученная структурная сетка задает необходимую геометрию кристаллитной структуры (количество и плотность упаковки агрегатов и кристаллитов), т.е. обеспечивает ее изменение, влияющее в конечном итоге и на свойства кристаллического сростка.

Образование структурированной жидкой фазы может опираться и на способ введения пластификаторов и суперпластификаторов (СП) как средств наномодификации. Их использование позволяет регулировать процесс агломерации кристаллов за счет изменения типа физико-химической адсорбции на границе раздела фаз. Структурообразующее участие пластифицирующих добавок связано с механизмами, обеспечивающими изменение термодинамики и кинетики процесса, давая возможность регулирования размеров и формы агломерата, сростка, количества в них кристаллов и их контактов.

Важно подчеркнуть, что процесс агломерации переводит структуру в ее эволюции из нанометрового в микрометровый размерный диапазон. При этом из отдельных кристаллов формируется структура, представленная фазами типичных минералого-морфологических разностей, заполняющих межзерновой объем в композите так, что образуется непрерывный пространственный каркас, составляющий в итоге связующее, цементирующее вещество, матрицу конгломератного материала.

В эволюционном маршруте между третьей стадией агломерации и четвертой стадией самопроизвольного и самоорганизованного структурообразования развивается явление морфологического отбора, стимулируемое приближением размера, формы, состояния частиц их агломератов, кристаллитов к равновесным.

Поясним, что на стадии роста и агломерации возникающие образования отличаются неравновесностью состояния (в термодинамическом смысле), поэтому в самопроизвольном и самоорганизующемся структурообразовании их размер и форма изменяются так, чтобы обеспечивалась минимальность значений внутренней и поверхностной энергии системы. Морфологический отбор также определяет эволюционный переход структуры на новый уровень – уровень цементирующего вещества. Имеющее место модификация на уровне формирования цементирующего вещества затрагивает объемное соотношение кристаллической и аморфной фаз, т.е. объемное соотношение морфологических разностей скрытокристаллической, волокнисто-игольчатой, пластинчато-призматической; оно изменяет также удельный объем кристаллических и гелевых пор. И это, безусловно, сопровождается эволюцией свойств композита.

Сущностно, параметры кинетики процессов на четвертой стадии самопроизвольного и самоорганизующегося структурообразования определяются, с одной стороны, тепло- и массообменом с питающей (внутренней и внешней) средой, а с другой – молекулярно-кинетическими явлениями на границе

«поверхность твердой фазы (или кристаллического сростка) – среда». Концептуальных моделей для описания механизма этого достаточно много. Из них в наших рассмотрениях уравнение В. Яндера [12] может быть применено в предположении, что лимитирующей стадией процесса выступает диффузия реагентов через слой продукта взаимодействия (dx/dt), а его диффузионные слои на поверхности зерен исходных компонентов являются плоскими. При этом скорость формирования единой трехмерной кристаллической структуры определяется толщиной слоя продукта кристаллизации (x); константами, зависящими от свойств реагентов и условий процесса (коэффициентов k_2, k_3, k_4 , характеризующих природу реагирующих веществ) и времени процесса (t).

$$\frac{dx}{dt} = \frac{k_2}{x}, \text{ или } x = k_3 \sqrt{t}, \quad x^2 = k_4 t. \quad (16)$$

С учетом этого технологическим способом изменения термодинамики и кинетики процесса на данной четвертой стадии может выступать регулирование режимов температурной обработки. Складывающаяся при этом морфология цементирующего вещества определяется изменением морфологического параметра ($\Delta l/l$) в начальный период кристаллизации единой трехмерной кристаллической структуры. Она зависит от ряда факторов: начальной длины (l) и объема (V) твердой фазы, их изменения (Δl) и (ΔV) за время t ; радиуса частицы твердой фазы (r); поверхностного натяжения на границе жидкость – твердая фаза (σ); вязкости жидкой фазы (η).

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\Delta V}{V} \approx \frac{9\sigma l}{4\eta r} \cdot t. \quad (17)$$

В результате такого модифицирующего воздействия можно:

- 1) добиться изменения состояния межкристаллитной поверхности системы;
- 2) способствовать образованию дополнительных видов границ раздела;
- 3) сформировать упорядоченные структуры твердения с плотной упаковкой кристаллов с соответствующим изменением структуры пористости кристаллического сростка.

На четвертой стадии самопроизвольного и самоорганизующегося структурообразования последствия нанотехнологического модифицирования, предпринятого на предшествующих стадиях, будут проявляться опосредованно. Например, это может относиться к явлению зонирования структуры твердения. Микрообъемы структуры твердения будут оказываться в поле энергетического, термодинамического влияния вводимых наноразмерных частиц добавок, что может сопровождаться формированием организованной структуры как системы кристаллитов из гидратных фаз (организованной с точки зрения геометрии зон, меры их дробности, однородности размещения в объеме связующего вещества). Все это может контролироваться, и с учетом этого предпринятые на предыдущих стадиях нанотехнологические воздействия могут корректироваться.

Заключение. Систематизация и анализ основных концептуальных моделей гетерогенных процессов структурообразования неорганических систем твердения позволили представить явления зарождения фазы, роста частиц, их агломерации, самопроизвольного и самоорганизованного превращения

во времени как существенно понимаемые предмет и цель нанотехнологического управления.

Важно, что при такой систематизации и анализе моделей выделены управляющие факторы прямого наномодифицирования структуры на уровне кристаллитов, индивидуальных кристаллов и кристаллического сростка. Показано, что действие таких факторов на уровне получаемой структуры цементирующего вещества состоит в изменении соотношения в нем морфологических разностей, в кластеризации и объемном зонировании микроструктуры.

Рассмотренные концептуальные модели в проблеме наномодифицирования структуры систем твердения определяют возможность перехода к научно-обоснованному решению прикладных задач повышения эффективности технологий и качества композиционных строительных материалов [13].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Артамонова О.В., Чернышов Е.М. Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов. Ч. 1: Общие проблемы фундаментальности, основные направления исследований и разработок // Стройт. материалы. 2013. № 9. С. 82–95.
2. Чернышов Е.М. Закономерности развития структуры автоклавных материалов // Стройт. материалы. 1992. № 11. С. 28–31.
3. Баженов Ю.М., Королев Е.В. Нанотехнология и наномодифицирование в строительном материаловедении. Зарубежный и отечественный опыт // Вестн. Белгород. гос. технолог. ун-та им. В.Г. Шухова. 2007. № 2. С. 17–22.
4. Комохов П.Г. Золь-гель как концепция нанотехнологии цементного композита, структура системы и пути ее реализации // Вестн. Белгород. гос. технолог. ун-та им. В.Г. Шухова. 2007. № 1. С. 19–23.
5. Пухаренко Ю.В., Никитин В.А., Летенко Д.Г. Наноструктурирование воды затворения как способ повышения эффективности пластификаторов бетонных смесей // Стройт. материалы. 2006. № 9. С. 86–88.
6. Чернышов Е.М., Артамонова О.В., Славчева Г.С. Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов. Ч. 2: К проблеме концептуальных моделей наномодифицирования структуры // Стройт. материалы. 2014. № 4. С. 73–84.
7. Мелихов И.В. Физико-химическая эволюция твердого вещества. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 309 с.
8. Nanoscale materials in chemistry / Ed. by K.J. Klabunde. N. Y.: A John. Wiley & Sons Inc, 2001. 292 р.
9. Коротких Д.Н., Артамонова О.В., Чернышов Е.М. О требованиях к наномодифицирующим добавкам для высокопрочных цементных бетонов // Нанотехнологии в строительстве. 2009. № 2. С. 42–49.
10. Гудилин Е.А., Елисеев А.А. Процессы кристаллизации в химическом материаловедении. М.: МГУ, 2006. 90 с.
11. Третьяков Ю.Д., Лепис Х. Химия и технология твердофазных материалов. М.: МГУ, 1985. 364 с.
12. Вест А. Химия твердого тела. Теория и приложения: В 2-х ч. Ч. 1, 2 / пер. с англ. М.: Мир, 1988. 336 с.
13. Чернышов Е.М., Славчева Г.С., Артамонова О.В. К концептуальным моделям управления сопротивлением разрушению наномодифицированных структур конгломератных строительных композитов // Известия КГАСУ. 2014. № 3 (29). С. 156–161.

Артамонова Ольга Владимировна, канд. хим. наук, доц.; E-mail: ol_artam@rambler.ru
Воронежский государственный технический университет
Чернышов Евгений Михайлович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., директор
Образовательного творческого академического центра «Архстройнаука»;
E-mail: chem@vgsu.vrn.ru
Воронежский государственный технический университет

Получено 05.04.18

Artamonova Ol'ga Vladimirovna, PhD, Ass. Professor; E-mail: ol_artam@rambler.ru
Voronezh State Technical University, Russia

Chernyshov Evgeny Mikhaylovich, Acad. RAACS, DSc, Professor, Director of the
Academic Center; E-mail: chem@vgsu.vrn.ru
Voronezh State Technical University, Russia

TO THE PROBLEM OF CONCEPTUAL MODELS OF MANAGEMENT OF THE EVOLUTIONARY ROUTE OF FORMATION OF NANOMODIFIED SOLID SYSTEMS IN THE STRUCTURE OF CONSTRUCTION COMPOSITES

This article discusses the problem of controlling the process of forming the nanostructure of inorganic systems for hardening building composites. The conceptual models of the stages of the condensation process of phase nucleation, particle growth, agglomeration, spontaneous structure formation in the evolutionary route of formation of the solid phase of hardening systems are analyzed as basic. At the same time, the factors controlling the kinetic characteristics of the realization of the stages of the condensation process are singled out, a system of the means forming the “nano” arsenal is proposed for the technology of nanomodifying inorganic systems for hardening the hydratational synthesis, hydrothermal synthesis, thermal synthesis types used in the construction of building composites. The practical significance of the research carried out for the technology of materials on the criteria of the energy efficiency of the process of structure formation of the cement hardening system (E), the duration of its flow and completion (τ), the achieved level of material quality by its structural and functional characteristics (R).

К e y w o r d s: structure of building composites, inorganic systems hardening, evolutionary route of condensation, conceptual models of structure formation, nanomodifying of hardening systems, control factors for nanomodifying.

REFERENCES

1. Artamonova O.V., Chernyshov E.M. Kontseptsii i osnovaniya tekhnologiy nanomodifitsirovaniya struktur stroitel'nykh kompozitov. Chast' 1: Obshchie problemy fundamental'nosti, osnovnye napravleniya issledovanii i razrabotok [Concepts and foundations of technologies for nanomodifying structures of building composites. Part 1: General problems of fundamentality, the main directions of research and development]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2013. No. 9. Pp. 82–95. (in Russian)
2. Chernyshov E.M. Zakonomernosti razvitiya struktury avtoklavnykh materialov [Regularities in the development of the structure of autoclave materials]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 1992. No. 11. Pp. 28–31. (in Russian)
3. Bazhenov Yu.M., Korolev E.V. Nanotekhnologiya i nanomodifitsirovaniye v stroitel'nom materialovedenii. Zarubezhnyy i otechestvennyy opyt [Nanotechnology and nanomodification in building materials science. Foreign and domestic experience]. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova [Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov]. 2007. No. 2. Pp. 17–22. (in Russian)

4. Komokhov P.G. Zol'-gel' kak kontseptsiya nanotekhnologii tsementnogo kompozita, struktura sistemy i puti ee realizatsii [Sol-gel as a concept of nanotechnology of cement composite, structure of the system and ways to implement it]. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova [Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov]. 2007. No. 1. Pp. 19–23. (in Russian)
 5. Pukharenko Yu.V., Nikitin V.A., Letenko D.G. Nanostrukturirovaniye vody zatvoreniya kak sposob povysheniya effektivnosti plastifikatorov betonnykh smesey [Nanostructuring of mixing water as a way to increase the efficiency of plasticizers of concrete mixtures]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2006. No. 9. Pp. 86–88. (in Russian)
 6. Chernyshov E.M., Artamonova O.V., Slavcheva G.S. Kontseptsii i osnovaniya tekhnologiy nanomodifitsirovaniya struktur stroitel'nykh kompozitov. Chast' 2: K probleme kontseptual'nykh modeley nanomodifitsirovaniya struktury [Concepts and foundations of technologies for nanomodifying structures of building composites. Part 2: To the problem of conceptual models of nanomodifying the structure]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2014. No. 4. Pp. 73–84. (in Russian)
 7. Melikhov I.V. Fiziko-khimicheskaya evolyutsiya tverdogo veshchestva [Physicochemical evolution of a solid]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2009. 309 p. (in Russian)
 8. Nanoscale materials in chemistry. Ed. by K.J. Klabunde. New York: A John. Wiley & Sons Inc, 2001. 292 p.
 9. Korotkikh D.N., Artamonova O.V., Chernyshov E.M. O trebovaniyakh k nanomodifitsiruyushchim dobavkam dlya vysokoprochnykh tsementnykh betonov [On the requirements for nanomodifying additives for high-strength cement concretes]. Nanotekhnologii v stroitel'stve [Nanotechnologies in construction]. 2009. No. 2. Pp. 42–49. (in Russian)
 10. Gudilin E.A., Eliseev A.A. Protsessy kristallizatsii v khimicheskikh materialovedenii [Crystallization processes in chemical materials science]. Moscow, MGU, 2006. 90 p. (in Russian)
 11. Tret'yakov Yu.D., Lepis Kh. Khimiya i tekhnologiya tverdofaznykh materialov [Chemistry and technology of solid-phase materials]. Moscow, MGU, 1985. 364 p. (in Russian)
 12. West A. Khimiya tverdogo tela. Teoriya i prilozheniya: V 2-h ch. Ch. 1, 2 [Chemistry of a solid. Theory and applications in 2 hours. Part 1, 2]. Transl. from English. Moscow, Mir, 1988. 336 p. (in Russian)
 13. Chernyshov E.M., Slavcheva G.S., Artamonova O.V. K kontseptual'nym modeliam upravleniya soprotivleniem razrusheniyu nanomodifitsirovannykh struktur konglomeratnykh stroitel'nykh kompozitov [To conceptual models of controlling the resistance to the destruction of nanomodified structures of conglomerate construction composites]. Izvestiya KGASU [Proceedings of KSASU]. 2014. No. 3 (29). Pp. 156–161. (in Russian)
-

УДК 691.31 : 666.964.3

С.Ю. ШЕХОВЦОВА, М.А. ВЫСОЦКАЯ, Е.В. КОРОЛЕВ

КРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТЕРМОДЕСТРУКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ В АСФАЛЬТОБЕТОНЕ НА ОСНОВЕ ОКИСЛЕННЫХ И ОСТАТОЧНЫХ БИТУМОВ

Рассмотрен отечественный и зарубежный опыт исследования влияния различных агрессивных факторов на процессы старения асфальтобетона. Изучены основные особенности термодеструктивных процессов, происходящих в асфальтобетоне, приготовленных на основе окисленных и остаточных битумов. Моделирование термоокислительного старения асфальтобетона в процессе его производства производили на смесях по методу TFOT согласно стандарту STM D 1754 с использованием термо-камеры «Binder», оборудованной системой равномерного распределения воздуха по объему камеры. Изучение деструкции асфальтобетонных смесей производили в течение различных промежутков времени. Предложены частные и обобщенный критерии качества, отражающие стабильность эксплуатационных свойств асфальтобетона к термодеструкции.

Ключевые слова: компаундированный остаточный нефтяной битум, окисленный нефтяной битум, полимерно-битумное вяжущее, асфальтобетон, термоокислительное старение, деструкция, критерии качества.

Проблема повышения эффективности и качества покрытий автомобильных дорог, разработка и внедрение современных композиционных материалов и технологий дорожного строительства, обеспечивающих их высокие эксплуатационные характеристики и технологичность, осложняется сокращением финансирования дорожной отрасли. Транспортно-эксплуатационное состояние основной сети автомобильных дорог общего пользования Российской Федерации вызывает необходимость поиска новых технологических решений. Сложившаяся ситуация усугубляется постоянным увеличением нагрузки на дорожные покрытия, что обусловлено быстрым ростом числа транспортных средств. Это приводит к снижению качества асфальтобетонного конструктивного слоя покрытия и негативно сказывается на безопасности дорожного движения.

Под влиянием механических нагрузок, возникающих от движения автомобильных транспортных средств, а также вследствие воздействия окружающей среды в первом эксплуатационном периоде в покрытии наблюдаются деформации доуплотнения, затем наступает стадия постстабилизации, возникающая вследствие протекания необратимых процессов в битумных пленках, а также протекает упрочнение связей на границе раздела «минеральный материал – битум». В этот период механические свойства асфальтобетона повышаются. Дальнейшая эксплуатация приводит к появлению и накоплению трещин, развитие которых разрушает дорожное покрытие [1–3].

На битумное вяжущее в асфальтобетоне оказывает влияние температура, солнечное облучение, атмосферный кислород воздуха, вода и растворы

солей, органические соединения искусственного и природного происхождения, бактерии и динамические нагрузки от транспортных средств и др. [1–4]. Такие факторы, как температура и солнечное облучение, воздействия химических соединений и механических нагрузок, вызывают структурные преобразования в битуме: конфигурационные изменения, разрыв химических связей и, как следствие, образование свободных радикалов. Стойкость битумов к действию температуры и кислорода зависит от их строения и прежде всего от наличия легкоокисляющихся групп и кратных связей в макромолекулах. Известно, что ненасыщенные соединения подвержены действию кислорода в большей степени, чем насыщенные [2].

Существующие представления о старении битума основываются на механизме окисления высокомолекулярных углеводородов нефти. Основы теории медленного окисления органических соединений, предложенные А.Н. Бахом [5], заключаются в том, что окисление органических веществ происходит через промежуточное образование перекисей, легко вступающих во взаимодействие. Согласно теории Н.И. Семенова [6], окисление углеводородов является цепным процессом, идущим по радикальному механизму: молекулярная цепь разрывается с образованием радикалов – алкильного (R) и перекисного (RO_2). Накапливаясь в веществе, цепи одновременно с этим распадаются, что способствует образованию дополнительных радикалов, являющихся источником развития новых цепей [7]. Цепной механизм окисления подтверждают исследования по изучению процессов окисления углеводородов нефти, проведенные Н.И. Черножуковым, С.Э. Крейном и С.Р. Сергеенко [8–11], а также изучение процессов старения битумов методом электронного парамагнитного резонанса [12, 13].

Необходимо отметить некорректность рассмотрения окисления как доминирующего фактора старения битума, что обусловлено естественной зависимостью скорости химического процесса (окисления) от температуры (закон Вант-Гоффа). Причем скорость химической реакции от температуры имеет степенную зависимость. Однако температура ускоряет и физико-химические процессы, например диффузию, что способствует ускорению как химической реакции, так и сегрегации продуктов взаимодействия. Указанное закономерно влияет на физико-механические свойства битума.

Структурные изменения, происходящие при деструкции в асфальтобетоне, в основном связаны со структурными изменениями битума, но химико-минералогический состав и строение минерального материала также оказывают определенное влияние. Адсорбированный битум, в сравнении с физически свободным, имеет меньшую подвижность молекул в адсорбционно-сolvватных слоях, что нивелирует влияние температуры и обеспечивает снижение их реакционной способности [14]. Так, в исследованиях [15–17] установлено, что химически активные минеральные дисперсные фазы плотной структуры (известняк, доломит) способствуют замедлению процессов старения. Авторы указанных работ объясняют это значительным снижением образования в битуме кислородсодержащих соединений, что идентично повышению энергии активации термоокислительных процессов в органическом вяжущем. При этом минеральные дисперсные фазы (наполнители) из тонкопористых известняков, а также из инактивных материалов любой

структуры (например, кварцевые), наоборот, способствуют ускорению процессов старения.

Ввиду длительности и сложности натурных исследований старения асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов в настоящее время существует небольшое количество объективных критериев, позволяющих прогнозировать физико-механические свойства и эксплуатационные показатели асфальтобетонных покрытий после их устройства. Одновременно с этим важно отметить, что критерии, характеризующие необратимые изменения состава и структуры асфальтобетона при старении, являются лишь косвенными показателями, частично позволяющими прогнозировать структурообразование материала в эксплуатационный период.

В 1972 г. Г.С. Бахрахом [18] было предложено считать пороговым значением для начала работ по восстановлению асфальтобетона (с учетом запаса) увеличение прочности на 30 % и снижение показателя водостойкости до 0,9 и менее. Результаты исследования [19] показывают, что только 80%-е увеличение прочности при расколе водонасыщенных асфальтобетонных образцов приближается к пороговому значению.

Из-за сильной зависимости процессов старения асфальтобетона от скорости диффузии кислорода в пленку битума большое значение имеет плотность асфальтобетонного покрытия. Однако в работе [20] установлено, что ни остаточная пористость, ни воздухопроницаемость не могут характеризовать склонности асфальтобетона к старению. Г.С. Бахрах, используя данные американских ученых, предложил критерий устойчивости материала против действия термоокислительных факторов – коэффициент воздуходоступности $K_{вд}$ [20], рассчитываемый как отношение водонасыщения образца к расчетной толщине битумной пленки.

Теоретической предпосылкой прогнозирования долговечности асфальтобетонного покрытия В.Д. Шестеркиным была принята зависимость физико-механических характеристик асфальтобетона от количества битума, определяемого как разница между отдохиванным битумом и его потерями в любой момент времени (сумма количества битума, поглощенного минеральным материалом, испарившихся легких фракций битума, полимеризованного количества битума, количество битума, вытесненного из контактной зоны при активированной гидратации минеральных частиц в условиях дезинтеграции минерального материала под действием транспорта). Критическая потеря битума 22 % приводит к необратимым изменениям качества асфальтобетонного покрытия: резко снижается водостойкость и наблюдается неспособность релаксировать напряжения от низкотемпературных действий и транспортных средств [21].

В.Д. Голдиной предложен ускоренный метод прогнозирования свойств асфальтобетонов во времени с использованием неразрушающего ультразвукового импульсного метода по определению скорости прохождения ультразвуковых волн через образец, подвергаемый терmostатированию в климатической камере во времени при 60 °C.

Известно, что существует прямая взаимосвязь между особенностями структуры, реологическими свойствами и химическим составом битума. Изменение последнего часто используют в качестве характеристики интенсивности процессов старения. Для ее оценки используют показатель скорости

изменения структуры – рост количества асфальтенов, кинетика изменения когезии битумов во времени в условиях выдерживания их при высоких температурах [22].

Учитывая, что вязкость (пластическое течение) асфальтобетона при расчетной температуре является основным критерием его трещиностойкости, то оценку интенсивности старения и момента образования трещин в покрытиях авторы [22] рекомендуют проводить с учетом вязкопластичных свойств асфальтобетона, а кинетику роста вязкости асфальтобетона во времени описывают уравнением

$$\eta = A e^{\varphi t}, \quad (1)$$

где A – постоянная; φ – фактор старения; t – время.

Данное уравнение отражает процесс деструкции асфальтобетона после стадий уплотнения и постстабилизации.

С позиции обеспечения трещиностойкости асфальтобетона в пределах заданного срока службы В.Д. Голдиной предлагается оценивать долговечность асфальтобетона по трещиностойкости T_p с помощью следующей зависимости:

$$T_p = \frac{\lg \eta - 1,1 \lg \eta_h}{n_c}, \quad (2)$$

где η – предельное значение вязкости трещиностойкого асфальтобетона при расчетной низкой температуре;

η_h – начальная вязкость асфальтобетона при той же температуре;

n_c – коэффициент старения асфальтобетона;

1,1 – коэффициент приведения начальной вязкости к условно-начальной, соответствующей линейному изменению логарифма вязкости от времени.

В.Д. Голдиной было установлено, что если начальная вязкость η_h и коэффициент старения n_c относятся к определенному составу асфальтобетона, то получаемая из выражения (2) долговечность является фактической, а при подстановке в выражение (2) вместо долговечности T_p нормативный срок службы T_h можно получить расчетную допускаемую величину коэффициента старения асфальтобетона, использовав которую можно количественно устанавливать эффективность действия различных замедлителей старения, сопоставляя величины фактического и допускаемого коэффициентов старения.

Обобщение опыта в исследованиях механизмов старения битума показало, что работы, посвященные исследованию процессов старения асфальтобетона и прогнозирования долговечности асфальтобетона, в основном относятся к 60–80-м гг. XX столетия, что ввиду изменившихся климатических условий, а также глобальной транспортизации особенно повышает актуальность данного направления. Анализ рассмотренного опыта показывает, что основным процессом, вызывающим необратимые изменения состава и структуры битумов в асфальтобетонных смесях и асфальтобетонах, является термоокисление, протекающее особенно быстро при повышенных температурах по механизму цепных реакций с вырожденными разветвлениями. Это приводит к изменению химического и группового состава битума, в первую очередь, за счет накопления высокомолекулярных соединений. Поэтому в на-

стоящей работе производили оценку влияния термоокислительных процессов на структурно-чувствительные свойства асфальтобетона.

Основная масса битумов дорожного назначения в России получается путем окисления нефтяных остатков кислородом воздуха в окислительных реакторах различного типа. Этот энергоемкий и продолжительный процесс (от 10 до 24 ч) связан с окислительным дегидрированием радикального типа, приводящим к образованию пачечных структур асфальтенов, и выделением токсичных компонентов в виде отдува. Причем этому процессу подвергаются нефти различных месторождений и составов, что не всегда позволяет получать битумы, соответствующие требованиям нормативно-технических документов. Битумы, полученные по данной технологии, характеризуются слабой адгезией к минеральному наполнителю любого типа, что закономерно приводит к преждевременному разрушению покрытий автомобильных дорог.

Альтернативой окисленным битумам выступают остаточные, которые в основном получают по двум технологиям: при достаточно высоком вакуумировании остатка перегонки нефти или посредством компаундирования нефтяных остатков. Одно из таких вяжущих – битум компаундированный неокисленный БКН 130/200, полученный в результате смешения остаточных продуктов переработки нефти (Московская обл.), и контрольный битум БНД 90/130 производства ОАО «Славнефть-Янос» (г. Нижний Новгород), произведенный посредством глубокого окисления гудрона, были приняты в качестве объектов исследования в составе полимерно-битумного вяжущего, подобранныго ранее в работе [23]. Содержание полимера было одинаковым и составило 3,7 % от массы битума.

Оценку стойкости вида применяемого битума к термоокислительной деструкции проводили на асфальтобетонной смеси типа Б марки I, которая широко применяется при устройстве нижних и верхних слоев покрытия. Минеральная часть указанной асфальтобетонной смеси была подобрана в соответствии с требованиями ГОСТ 9128–2013. Содержание вяжущего определено по показателям водонасыщения и остаточной пористости асфальтобетонных образцов.

Моделирование процессов старения производили на асфальтобетонных смесях в печи при температуре 160 °C, внутри которой находится пластина с вращающейся осью. Продолжительность испытания составила 2 и 5 ч. Из смесей, подвергнутых термоокислительной деструкции, в последующем были заформованы образцы асфальтобетона. Их способность сопротивляться термоокислительным процессам оценивалась по изменению прочностных свойств образцов асфальтобетона при различных температурах испытаний, а также изменению водостойкости, сдвигостойчивости и трещиностойкости (табл. 1).

Сопоставление данных табл. 1 показывает, что асфальтобетон на ПБн-60, приготовленный на компаундированном битуме, имеет более высокие показатели прочности на сжатие при 20 и 0 °C, чем асфальтобетон, приготовленный с применением БНД 60/90. Однако более высокие значения прочности на сжатие свидетельствуют о повышенной жесткости асфальтобетона и именно из-за высокого показателя прочности на сжатие при 0 °C, поэтому этот асфальтобетон не может быть отнесен к I марке. Асфальтобетон

Таблица 1. Физико-механические характеристики асфальтобетонной смеси типа Б марки I до и после старения

Наименование показателя	Требования ГОСТ 9128–2013	Значение показателя свойств асфальтобетона типа Б марки I после термоокислительного старения, ч					
		на ПБВн-60			на ПБВ-60		
		0 ч	2 ч	5 ч	0 ч	2 ч	5 ч
Пористость минеральной части, %	Не более 19	18,7	18,6	18,7	18,6	18,7	18,7
Предел прочности при сжатии, МПа:							
при 50 °C	Не менее 1,1	1,8	2,5	3,5	1,9	2,9	4,5
при 20 °C	Не менее 2,0	5,7	5,8	6,6	5,4	8,2	10,1
при 0 °C	Не более 9,0	9,0	10,7	11,6	8,1	11,4	13,0
Сдвигостойчивость:							
по коэффициенту внутреннего трения	Не менее 0,81	0,92	0,88	0,86	0,92	0,79	0,74
по сцеплению при сдвиге при 50 °C, МПа	Не менее 0,30	0,54	0,86	1,20	0,53	1,20	1,00
Трещиностойкость по пределу прочности на растяжение при расколе при 0 °C, МПа	От 2,8 до 6,0	5,5	5,7	5,9	5,1	6,2	6,7
Водонасыщение, % по объему	От 1,0 до 2,5	2,5	1,4	1,5	2,5	2,9	0,9
Водостойкость	Не менее 0,90	1,04	0,98	0,95	0,91	0,79	0,74
Водостойкость при длительном водонасыщении	Не менее 0,85	0,97	0,90	0,85	0,86	0,72	0,66

на неокисленном битуме имеет более высокие показатели водостойкости (13 %), чем стандартный асфальтобетон.

Для формализации оценки стойкости асфальтобетона к старению (в частности, к термоокислительной деструкции), рационально использовать методы системного анализа посредством критериальной оценки, изложенной в [24, 25]. В качестве частных критериев предлагается использовать коэффициенты, описание которых представлено в табл. 2.

Как видно из табл. 2, все представленные критерии можно классифицировать на две группы, характеризующие физико-механические свойства ($k_{\text{пр}}$, $k_{\text{впр}}$, $k_{\text{нпр}}$, $k_{\text{ту}}$, $k_{\text{сдвиг}}$, $k_{\text{тр}}$) и эксплуатационные свойства ($k_{\text{вдпг}}$, $k_{\text{вдст}}$).

Учитывая данное разделение, предложенные частные критерии сведены в обобщенном критерии качества:

$$F_k = \alpha_1 \sqrt[6]{k_{\text{пр}} \cdot k_{\text{впр}} \cdot k_{\text{нпр}} \cdot k_{\text{ту}} \cdot k_{\text{сдвиг}} \cdot k_{\text{тр}}} + \alpha_2 \sqrt{k_{\text{вдпг}} \cdot k_{\text{вдст}}}, \quad (3)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты весомости.

Частные критерии показывают, как изменяется анализируемое свойство, и оценивают их соответствие требованиям ГОСТ или Заказчика, поэтому при расчете F_k целесообразно применять:

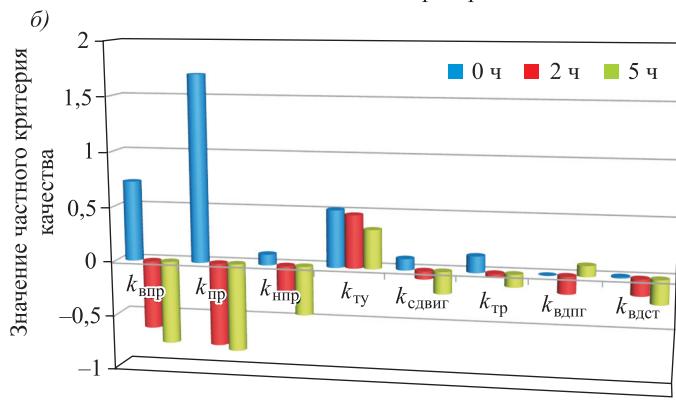
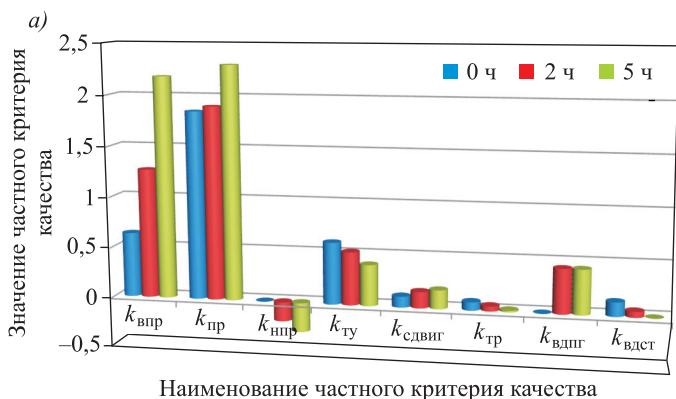
$$k_i = \begin{cases} \text{при } k_i \geq 0, k_i = 1, \\ \text{при } k_i < 0, k_i = 0. \end{cases}$$

Таблица 2. Частные критерии качества асфальтобетона

Показатель	Формула для вычисления	Примечание
1	2	3
Критерий прочности	$k_{\text{пр}} = \frac{R'_{\text{сж},20}}{R_{\text{сж},20}} - 1$	$R'_{\text{сж},20}$ и $R_{\text{сж},20}$ – предел прочности при сжатии при температуре 20 °C исследуемого асфальтобетона и требование ГОСТ для данного показателя, соответственно МПа. При увеличении критического значения предела прочности при сжатии на 50 % расчет ведется по формуле $k_{\text{пр}} = \frac{R_{\text{сж},20}}{R'_{\text{сж},20}} - 1$
Критерий высокотемпературной прочности	$k_{\text{впр}} = \frac{R'_{\text{сж},50}}{R_{\text{сж},50}} - 1$	$R'_{\text{сж},50}$ и $R_{\text{сж},50}$ – предел прочности при сжатии при температуре 50 °C исследуемого асфальтобетона и требование ГОСТ для данного показателя, соответственно МПа. При увеличении критического значения предела прочности при сжатии на 50 % расчет ведется по формуле $k_{\text{впр}} = \frac{R_{\text{сж},50}}{R'_{\text{сж},50}} - 1$
Критерий низкотемпературной прочности	$k_{\text{нпр}} = 1 - \frac{R'_{\text{сж},0}}{R_{\text{сж},0}}$	$R'_{\text{сж},0}$ и $R_{\text{сж},0}$ – предел прочности при сжатии при температуре 0 °C исследуемого асфальтобетона и требование ГОСТ для данного показателя, соответственно МПа
Критерий температурной устойчивости	$k_{\text{ты}} = \frac{R_{\text{сж},50} \cdot R'_{\text{сж},0}}{R_{\text{сж},0} \cdot R'_{\text{сж},50}}$	$R'_{\text{сж},50}$ и $R_{\text{сж},50}$ – предел прочности при сжатии при температуре 50 °C исследуемого асфальтобетона и требование ГОСТ для данного показателя; $R'_{\text{сж},0}$ и $R_{\text{сж},0}$ – предел прочности при сжатии при температуре 0 °C исследуемого асфальтобетона и требование ГОСТ для данного показателя, соответственно МПа
Критерий сдвигостойчивости	$k_{\text{сдвиг}} = \left(\frac{C'_\text{л}}{C_\text{л}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{\text{tg}'(\phi)}{\text{tg}(\phi)} - 1 \right)$	$C'_\text{л}$ и $C_\text{л}$ – лабораторный показатель сцепления при сдвиге исследуемого асфальтобетона и требование ГОСТ для данного показателя, соответственно МПа; $\text{tg}'(\phi)$ и $\text{tg}(\phi)$ – коэффициент внутреннего трения исследуемого асфальтобетона и требование ГОСТ для данного показателя соответственно

Окончание табл. 2

1	2	3
Критерий трещиностойкости	$k_{tp} = 1 - \frac{T'_p}{T_p}$	T'_p и T_p – трещиностойкость исследуемого асфальтобетона и требование ГОСТ для данного показателя, %
Критерий водопоглощения	$k_{vdpg} = 1 - \frac{W'}{W}$	W' и W – водонасыщение исследуемого асфальтобетона и требование ГОСТ для данного показателя, %
Критерий водостойкости	$k_{vdst} = \left(\frac{k'_{vd}}{k_{vd}} - 1 \right)$	k'_{vd} и k_{vd} – коэффициент стойкости после длительного водонасыщения исследуемого асфальтобетона и требование ГОСТ для данного показателя соответственно



Частные критерии качества асфальтобетона на основе ПБВн-60 (а); ПБВ-60 (б)

Результаты расчета частных критериев качества асфальтобетона, характеризующие его устойчивость к термоокислительным процессам, представлены на рисунке, а значения обобщенного критерия качества – в табл. 3.

Таблица 3. Обобщенный критерий качества от различных значений коэффициентов весомости

Коэффициенты весомости	Обобщенный критерий качества					
	на ПБВн-60			на ПБВ-60		
	0 ч	2 ч	5 ч	0 ч	2 ч	5 ч
$\alpha_1 = 0,5; \alpha_2 = 0,5$	1	0,5	0,5	1	0	0
$\alpha_1 = 0,75; \alpha_2 = 0,25$	1	0,25	0,25	1	0	0
$\alpha_1 = 0,25; \alpha_2 = 0,75$	1	0,75	0,75	1	0	0

Из табл. 3 видно, что величина F_k , независимо от значений коэффициентов весомости, зависит только от второго слагаемого формулы для расчета F_k . В этой связи примем

$$k_i = \begin{cases} \text{при } k_i \geq 0, k_i = 1, \\ \text{при } k_i < 0, k_i = -1, \end{cases}$$

а F_k преобразуем к виду

$$F_k^* = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 k_i.$$

Результаты, представленные в табл. 4, характеризуют количество показателей качества, соответствующих требованиям нормативных документов.

Таблица 4. Значение обобщенного критерия качества

Состав	Обобщенный критерий качества F_k^*			Обобщенный критерий качества F_k^{**}		
	0 ч	2 ч	5 ч	0 ч	2 ч	5 ч
АБ на ПБВн-60	1	0,75	0,75	0,43	0,53	0,65
АБ на ПБВ-60	1	-0,75	-0,5	0,41	-0,2	-0,26

Примечание. $F_k^{**} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 k_i$, где k_i – частный критерий качества, в соответствии с данными рисунка.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что асфальтобетоны, приготовленные на основе ПБВн-60, характеризуются большей устойчивостью к термоокислительным процессам старения, что свидетельствует о большей совместимости остаточного компаундированного битума с полимером и, как следствие, формировании более структурированной и устойчивой к разрушающим факторам структуры модифицированного вяжущего, что в свою очередь будет способствовать большей стабильности и надежности асфальтобетонных покрытий, выполненных с их использованием.

В ходе выполнения исследований по изучению вклада исходного битумного сырья на старение асфальтобетона была разработана расчетная методика, которая позволяет на ранней стадии оценить устойчивость асфальтобетона к термодеструктивным процессам.

Однако необходимо отметить, что в процессе эксплуатации на асфальтобетонное покрытие также оказывают агрессивное воздействие как циклические нагрузки от интенсивного потока транспортных средств, так и климатические факторы (дождь, снег, температура, ультрафиолетовое излучение). Поэтому дальнейшее изучение процессов деструкции асфальтобетонов следует проводить, учитывая весь комплекс действующих факторов, для обеспечения возможности адекватного прогнозирования срока эксплуатации дорожного покрытия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рыбьев И.А. Асфальтовые бетоны. М.: Высш. шк., 1969. 399 с.
2. Гезенцев Л.Б., Горелышев Н.В., Богуславский А.М. Дорожный асфальтобетон / под ред. Л.Б. Гезенцева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1985. 350 с.
3. Горелышев Н.В. Асфальтобетон и другие битумоминеральные материалы. М.: Можайск-Терра, 1995. 176 с.
4. Колбанская А.С., Михайлова В.В. Дорожные битумы. М.: Транспорт, 1973. 264 с.
5. Бах А.Н. О роли перекисей в процессах медленного окисления // Журн. рус. физ.-хим. общества. 1897. Вып. 6. № 29. С. 373.
6. Семёнов Н.Н. О некоторых проблемах химической кинетики. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 25 с.
7. Александров А.П., Журков С.Н. Явление хрупкого разрыва. М.: Гостехтеоретиздат, 1933. 13 с.
8. Черножуков Н.И., Луженский И.Л. О влиянии нефтяных асфальтосмольных веществ на окисление масел // Нефт. хоз-во. 1947. № 5. С. 30–35.
9. Черножуков Н.И., Крайн С.Э. Окисляемость минеральных масел. М.: Гостоптехиздат, 1955. С. 48–54.
10. Черножуков Н.И. Исследование в области окисления высокомолекулярных углеводородов и нефтяных масел в жидкой фазе // Проблемы окисления углеводородов. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 167 с.
11. Сергиенко С.Р. Высокомолекулярные соединения нефти. М.: Химия, 1964. 541 с.
12. Гоппель Д.М. Основы производства окисленных битумов // IV междунар. нефтяной конгресс. Т. IV. М.: Гостоптехиздат, 1956. 433 с.
13. Печений Б.Г. Исследование влияния кубовых остатков СЖК на свойства битумов в асфальтобетонах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Харьков: Ротапринт ХАДИ, 1967. 16 с.
14. Королев И.В. Модель строения битумной пленки на минеральных зернах в асфальтобетоне // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. 1981. № 8. С. 63–67.
15. Лысихина А.И. Влияние молекулярных поверхностных свойств асфальтобетонных смесей. М.: Дориздат, 1949. Вып. 8. 45 с.
16. Recasene R., Martinez A., Jimenez F., Bianchetto H. Effect of filler on the aging potential of asphalt mixtures // Journal of the Transportation Research Board. 2005. Vol. 1901. P. 10–17.
17. Лукашевич В.Н., Ефанов И.Н. Исследование влияния технологии приготовления асфальтобетонных смесей на процессы старения асфальтового вяжущего при использовании волокнистых сорбентов в качестве дисперсной арматуры // Вестн. ТГАСУ. 2012. № 2. С. 191–196.

18. Бахрах Г.С. Оценка термоокислительной стабильности асфальтовых материалов с учетом роли контактных взаимодействий // Тр. Союздорнии. 1975. Вып. 79. С. 132–140.
19. Бахрах Г.С. Учет процесса старения при проектировании состава битумоминеральных смесей // Автомоб. дороги. 1973. № 9. С. 8–9.
20. Бахрах Г.С. Старение асфальтобетонных покрытий и пути его замедления // Тр. Гипрдорнии. М., 1974. Вып. 9. С. 84–96.
21. Шестеркин В.Д. Определение периода нормальной работы асфальтобетонного дорожного покрытия // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. 1973. № 8. С. 133–135.
22. Прочность и долговечность асфальтобетона / под ред. Б.И. Ладыгина, И.К. Яцевича. Минск: Наука и техника, 1972. 286 с.
23. Шеховцова С.Ю., Высоцкая М.А., Обухов А.Г., Есипова Ю.Ю. Устойчивость модифицированных вяжущих на основе окисленных и остаточных битумов к термодеструкции // Вестн. СибАДИ. 2017. Вып. 6 (58). С. 140–147.
24. Бормотов А.Н., Прошин И.А., Королев Е.В. Математическое моделирование и многокритериальный синтез композиционных материалов. Пенза: ПГТА, 2011. 432 с.
25. Баженов Ю.М., Гарькина И.А., Королев Е.В. Системный анализ в строительном материаловедении. М.: МГСУ, 2012. 432 с.

Шеховцова Светлана Юрьевна, канд. техн. наук, ст. препод.; E-mail: SHehovtsovaSYU@mgsu.ru

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Высоцкая Марина Алексеевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: roruri@rambler.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Королев Евгений Валерьевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: korolev@nocnt.ru

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Получено после доработки 05.04.18

Shekhovtsova Svetlana Yur'evna, PhD, Senior Lecturer; E-mail: SHehovtsovaSYU@mgsu.ru
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

Vysotskaya Marina Alexeevna, PhD, Ass. Professor; E-mail: roruri@rambler.ru
Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Korolev Evgeny Valer'evich, DSc, Professor; E-mail: korolev@nocnt.ru
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

CRITERIAL ESTIMATION OF THERMAL DESTRUCTIVE PROCESSES IN ASPHALT CONCRETE ON THE BASIS OF OXIDIZED AND RESIDUAL BITUMEN

The paper considers domestic and foreign experience of studying the influence of various aggressive factors on the aging processes of asphalt concrete. The main features of thermo destructive processes occurring in asphalt concrete, prepared on the basis of oxidized and residual bitumen's, are studied. Modeling of thermal oxidative aging of asphalt concrete during its production was carried out on mixtures according to the TFOT method in accordance with STM D 1754 standard using a Binder thermal chamber equipped with a system of uniform air distribution over the chamber volume. Samples of mixtures of asphalt concrete were subjected to thermal exposure and tested in accordance with the standard procedure in accordance with the requirements of GOST 9128-2013. The study of the destruction of asphalt concrete mixtures was carried out for various time intervals. A special

and generalized quality criteria, reflecting the stability of exploiting properties of asphalt concrete to thermal destruction, are proposed.

Key words: compounded residual petroleum bitumen, oxidized petroleum bitumen, polymer-bitumen binder, asphalt concrete, thermal oxidation aging, degradation, quality criteria.

REFERENCES

1. Ryb'ev I.A. Asfal'tovye betony [Asphalt concretes]. Moscow, Higher school, 1969. 399 p. (in Russian)
2. Gesentsvey L.B., Gorelyshev N.V., Boguslavskiy A.M. Dorozhnyy asfal'tobeton [Road asphalt concrete]. Ed. L.B. Gesentsveya. 2 nd ed., rev. and add. Moscow, Transport, 1985. 350 p. (in Russian)
3. Gorelyshev N.V. Asfal'tobeton i drugie bitumomineral'nye materialy [Asphaltic concrete and other bituminous mineral materials]. Moscow, Mozhaysk-Terra, 1995. 176 p. (in Russian)
4. Kolbanskaya A.S., Mikhaylov V.V. Dorozhnye bitumy [Road bitumen]. Moscow, Transport, 1973. 264 p. (in Russian)
5. Bakh A.N. O roli perekisey v protsessakh medlennogo okisleniya [On the role of peroxides in the processes of slow oxidation]. Zhurnal russkogo fiziko-khimicheskogo obshchestva [Journal of the Russian Physico-Chemical Society]. 1897. Iss. 6. No. 29. P. 373. (in Russian)
6. Semenov N.N. O nekotorykh problemakh khimicheskoy kinetiki [On some problems of chemical kinetics]. Moscow, Izd-vo AN THE USSR, 1958. 25 p. (in Russian)
7. Aleksandrov A.P., Zhurkov S.N. Yavlenie khrupkogo razryva [The phenomenon of brittle fracture]. Moscow, Gostekhoretizdat, 1933. 13 p. (in Russian)
8. Chernozhukov N.I., Luzhenskiy I.L. O vliyanii neftyanykh asfal'tosmol'nykh veshchestv na okislenie masel [The phenomenon of brittle fracture]. Neftyanoe khozyaystvo [Oil industry]. 1947. No. 5. Pp. 30–35. (in Russian)
9. Chernozhukov N.I., Kreyen S.E. Okislyaemos' mineral'nykh masel [Oxidation of mineral oils]. Moscow, Gostoptekhizdat, 1955. Pp. 48–54. (in Russian)
10. Chernozhukov N.I. Issledovanie v oblasti okisleniya vysokomolekulyarnykh uglevodorodov i neftyanykh masel v zhidkoy faze [Research in the field of oxidation of high-molecular hydrocarbons and petroleum oils in the liquid phase]. Problemy okisleniya uglevodorodov [Problems of oxidation of hydrocarbons]. Moscow, Publishing house of the Academy of Sciences USSR, 1954. 167 p. (in Russian)
11. Sergienko S.R. Vysokomolekulyarne soedineniya nefti [High-molecular compounds of oil]. Moscow, Chemistry, 1964. 541 p. (in Russian)
12. Goppel' D.M. Osnovy proizvodstva okislennykh bitumov [Basics of production of oxidized bitumens]. IV mezhdunarodnyy neftyanoy congress. T. IV [IV International Petroleum Congress. Vol. IV]. Moscow, Gostoptekhizdat, 1956. 433 p. (in Russian)
13. Pechenyy B.G. Issledovanie vliyaniya kubovykh ostatkov SZHK na svoystva bitumov v asfal'tobetonakh: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk: 05.23.05 [Investigation of the effect of residual residues of SFA on the properties of bitumen in asphalt concrete: PhD abstract: 05.23.05]. Kharkov, Rotaprint HADI, 1967. 16 p. (in Russian)
14. Korolev I.V. Model' stroeniya bitumnoy plenki na mineral'nykh zernakh v asfal'tobetone [Model of the structure of bitumen film on mineral grains in asphalt concrete]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and architecture]. 1981. No. 8. Pp. 63–67. (in Russian)

15. Lysikhina A.I. Vliyanie molekulyarnykh poverhnostnykh svoystv asfal'to-betonnykh smesey [Influence of molecular surface properties of asphalt-concrete mixtures]. Moscow, Dorizdat, 1949. Iss. 8. 45 p. (in Russian)
 16. Recasene R., Martinez A., Jimenez F., Bianchetto H. Effect of filler on the aging potential of asphalt mixtures. Journal of the Transportation Research Board. 2005. Vol. 1901. Pp. 10–17.
 17. Lukashovich V.N., Fanov I.N. Issledovanie vliyaniya tekhnologii prigotovleniya asfal'tobetonnykh smesey na protsessy stareniya asfal'tovogo vyazhushchego pri ispol'zovaniyu voloknistykh sorbentov v kachestve dispersnoy armatury [Investigation of the influence of the technology of preparation of asphalt-concrete mixtures on aging processes of asphalt binders using fibrous sorbents as disperse reinforcement]. Vestnik TGASU [Bulletin of TSUAB]. 2012. No. 2. Pp. 191–196. (in Russian)
 18. Bakhrakh G.S. Otsenka termookislitel'noy stabil'nosti asfal'tovykh materialov s uchetom roli kontaktnykh vzaimodeystviy [Estimation of thermooxidative stability of asphalt materials taking into account the role of contact interactions]. Trudy Soyuzdornii [Proceedings of Soyuzdornii]. 1975. Iss. 79. Pp. 132–140. (in Russian)
 19. Bakhrakh G.S. Uchet protessa stareniya pri proektirovaniyu sostava bitum-mineral'nykh smesey [Accounting for the aging process in the design of the composition of bituminous mineral mixtures]. Avtomobil'nye dorogi [Automobile roads]. 1973. No. 9. Pp. 8–9. (in Russian)
 20. Bakhrakh G.S. Starenie asfal'tobetonnykh pokrytiy i puti yego zamedleniya [Aging of asphalt concrete pavements and ways to slow it down]. Trudy Giprodornii [Proceedings of Giprodornii]. Moscow, 1974. Iss. 9. Pp. 84–96. (in Russian)
 21. Shesterkin V.D. Opredelenie perioda normal'noy raboty asfal'tobetonnogo dorozhnogo pokrytiya [Determination of the period of normal operation of asphalt pavement]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and architecture]. 1973. No. 8. Pp. 133–135. (in Russian)
 22. Prochnost' i dolgovechnost' asfal'tobetona [Strength and durability of asphalt concrete]. Under ed. B.I. Ladygin, I.K. Yatsevich. Minsk, Science and Technika, 1972. 286 p. (in Russian)
 23. Shekhotsova S.Yu., Vysotskaya M.A., Obukhov A.G., Esipova Yu.Yu. Ustoychivost' modifitsirovannykh vyazhushchikh na osnove okislennykh i ostatochnykh bitumov k termodestruktsii [Stability of modified astringents on the basis of oxidized and residual bitumens to thermal degradation]. Vestnik SibADI [Bulletin of SibADI]. 2017. Iss. 6 (58). Pp. 140–147. (in Russian)
 24. Bormotov A.N., Proshin I.A., Korolev E.V. Matematicheskoe modelirovaniye i mnogokriterial'nyy sintez kompozitsionnykh materialov [Mathematical modeling and multicriteria synthesis of composite materials]. Penza, PGTA, 2011. 432 p. (in Russian)
 25. Bazhenov Yu.M., Gar'kina I.A., Korolev E.V. Sistemnyy analiz v stroitel'nom materialovedenii [System analysis in building materials science]. Moscow, MSUCE, 2012. 432 p. (in Russian)
-

УДК 691:699.86

И.В. СУСОЕВА

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ОТХОДОВ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Композиционные плитные материалы с наполнителями из мягких отходов древесины и невозвратных отходов переработки льна и хлопка на основе матрицы из термореактивного связующего могут использоваться в качестве строительного материала теплоизоляционного назначения. Рассмотрено влияние доли добавки фенолформальдегидной смолы (ФФС) на показатели композиционных плитных материалов. Приведены результаты физико-механических показателей плитных материалов.

Ключевые слова: теплоизоляционные плиты, прочность, статический изгиб, коэффициент теплопроводности, водопоглощение, разбухание, растительные отходы.

Отходы растительных материалов, в том числе мягкие отходы древесины и отходы прядильных производств, – важное сырье для производства композиционных плитных материалов. Перспективными являются композиционные плитные материалы из невозвратных отходов прядения льняных и хлопковых волокон на основе матрицы из термореактивного связующего. Данный вид отходов не используется для изготовления продукции. Возвращение в производство данных отходов позволяет снизить негативное воздействие невозвратных отходов на окружающую среду и получить изделия со сниженными затратами на изготовление растительного наполнителя. Теплоизоляционные материалы из отходов производства льняного и хлопкового волокна могут применяться для теплоизоляции в малоэтажном строительстве.

В качестве связующего для производства данных материалов может использоваться фенолформальдегидная смола (ФФС). Использование ФФС позволяет получать композиционные материалы с широким диапазоном физико-механических показателей. Dipak K. Raval и коллеги отмечают, что преимуществами использования фенолформальдегидной смолы являются относительно низкая стоимость и хорошая адгезия к растительным материалам [1]. Фенольные смолы используют для придания композитам на основе растительных наполнителей повышенной водостойкости и необходимых механических свойств [2]. Хорошая адгезия ФФС к разным видам наполнителей обуславливает возможность создания композиционных материалов с наполнителями из углеродных [3] и стеклянных волокон [4].

К числу теплоизоляционных материалов на основе фенолформальдегидных смол относятся изделия из минеральных волокон и фенольные пенопласты. Многие исследователи утверждают, что у минераловатных плит есть существенный недостаток – большое водопоглощение, обусловленное способностью удерживать воду в межволоконных пространствах, приводящее

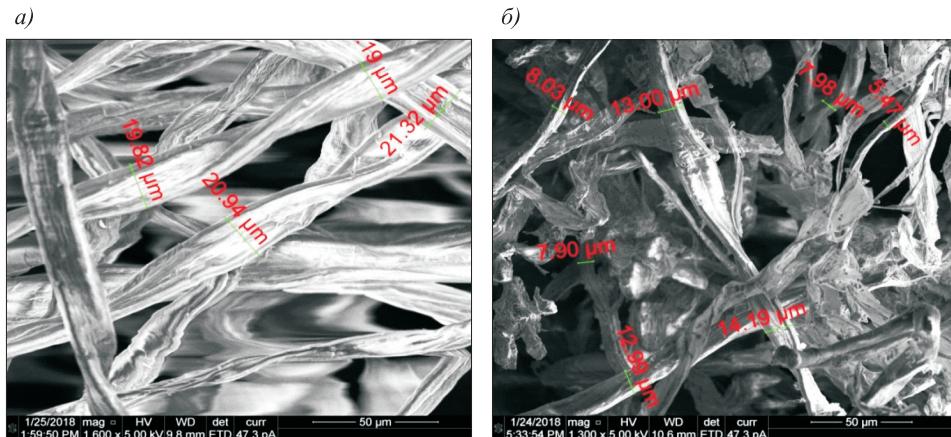


Рис. 1. Структура и размеры растительного наполнителя при переработке волокна хлопка (а) и волокна отходов переработки хлопка (б)

к потере его теплоизоляционных свойств. В.П. Ярцев и А.М. Дорофеев исследовали водопоглощение минераловатных плит. Авторами в работе установлено, что при увеличении температуры от 20 до 60 °С водопоглощение плит увеличивается в три раза [5]. По данным Iñigo Antepara и коллег, использование минераловатной плиты в качестве внутренней тепловой изоляции способствует накоплению воды в ней, что приводит к потере теплоизоляционных свойств [6].

Совершенствование теплоизоляционных материалов является актуальной задачей строительной отрасли. Источником сырья для производства теплоизоляционных материалов могут служить безвозвратные отходы производства льняного и хлопкового волокон. Layth Mohammed и коллеги отмечают [7], что химический состав и свойства растительных волокон оказывают влияние на физико-механические свойства композита. С увеличением содержания целлюлозы повышаются прочностные характеристики композита [8–10]. На свойства композитов значительно влияют такие параметры технологического процесса, как фракционный состав наполнителя, доля добавки связующего, режимы сушки материала и другие факторы [11].

Сложности использования безвозвратных пылевидных отходов в качестве наполнителя композиционных плит обусловлены значительным повреждением растительных волокон, увеличением впитываемости связующего в наполнитель, большой удельной поверхностью частиц. Об этом можно судить по фотографиям растительных отходов, полученным в ходе исследований с использованием микроскопа МС 20.1 (рис. 1, 2).

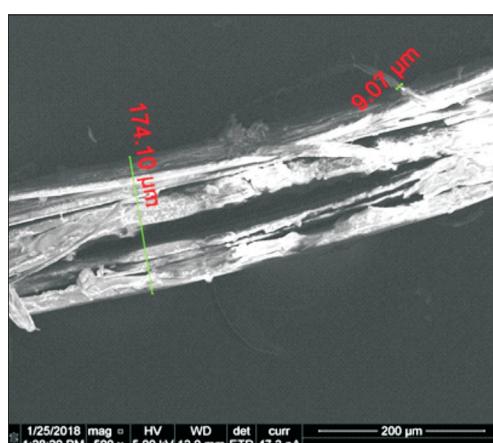


Рис. 2. Отходы переработки льна

В лаборатории кафедры Лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств (ЛДП) Костромского государственного университета (КГУ) исследованы физико-механические показатели композиционных плитных материалов на основе наполнителей из безвозвратных отходов производства хлопковых, льняных волокон и мягких отходов древесины на основе матрицы из ФФС. Композиционный материал теплоизоляционного назначения изготавливался средней плотности 275 кг/м³, расход связующего от 0 до 30 % от массы наполнителя. Образцы материала высушивались при 100 и 170 °C до влажности 8±1 %. Состав компонентов, используемых для создания композиционных материалов, представлен в табл. 1, 2.

Таблица 1. Состав композиционного материала

Содержание компонентов, мас. %			
Связующее	Наполнитель	Вода	Сульфат алюминия
0–30,0	55–98	1,5–12,0	0,5–3,0

Таблица 2. Состав наполнителя композиционного материала

№ композита	Невозвратные отходы растительных волокон		Мягкие отходы древесины	
	вид	содержание компонентов, мас. %	вид	содержание компонентов, мас. %
1	Хлопок	55–98	—	—
2	Хлопок	44–78,4	Опилки лиственных пород (береза)	11–19,6
3	Хлопок	27,5–49	Опилки лиственных пород (береза)	27,5–49
4	Хлопок	44–78,4	Опилки хвойных пород (сосна)	11–19,6
5	Хлопок	27,5–49	Опилки хвойных пород (сосна)	27,5–49
6	Хлопок	44–78,4	Кора лиственных пород (береза)	11–19,6
7	Хлопок	27,5–49	Кора лиственных пород (береза)	27,5–49
8	Хлопок	44–78,4	Кора хвойных пород (сосна)	11–19,6
9	Хлопок	27,5–49	Кора хвойных пород (сосна)	27,5–49
10	Лен	55–98	—	—
11	Лен	44–78,4	Опилки лиственных пород (береза)	11–19,6
12	Лен	27,5–49	Опилки лиственных пород (береза)	27,5–49
13	Лен	44–78,4	Опилки хвойных пород (сосна)	11–19,6
14	Лен	27,5–49	Опилки хвойных пород (сосна)	27,5–49
15	Лен	44–78,4	Кора лиственных пород (береза)	11–19,6
16	Лен	27,5–49	Кора лиственных пород (береза)	27,5–49
17	Лен	44–78,4	Кора хвойных пород (сосна)	11–19,6
18	Лен	27,5–49	Кора хвойных пород (сосна)	27,5–49

В табл. 3–5 приведены регрессионные модели зависимостей физико-механических показателей композиционных плитных материалов (Y) от доли добавки связующего (x). Снижение прочности выражается функцией

Таблица 3. Зависимости предела прочности при статическом изгибе композиционных плитных материалов от доли добавки связующего ФФС

Композиционный материал	Зависимости предела прочности при статическом изгибе плит Y , % от доли добавки связующего x	Достоверность аппроксимации R^2
<i>При температуре сушики $T = 100^\circ\text{C}$</i>		
Плиты из хлопка	$Y = 0,0107x + 0,196$	0,8883
	$Y = -0,0004x^2 + 0,0225x + 0,1518$	0,9813
	$Y = 2 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,0012x^2 + 0,0311x + 0,1374$	0,9907
Плиты из льна	$Y = 0,0098x + 0,3196$	0,9549
	$Y = -0,0002x^2 + 0,0157x + 0,2973$	0,9853
	$Y = 8 \cdot 10^{-6}x^3 - 0,0006x^2 + 0,02x + 0,2901$	0,9883
<i>При температуре сушики $T = 170^\circ\text{C}$</i>		
Плиты из хлопка	$Y = 0,0091x + 0,2883$	0,846
	$Y = -0,0004x^2 + 0,0212x + 0,243$	0,9746
	$Y = 1 \cdot 10^{-5}x^3 - 0,0011x^2 + 0,0284x + 0,231$	0,9834
Плиты из льна	$Y = 0,0099x + 0,4719$	0,9372
	$Y = 0,0003x^2 + 0,0175x + 0,4433$	0,9856
	$Y = 3 \cdot 10^{-6}x^3 - 0,0004x^2 + 0,0192x + 0,4405$	0,986

Таблица 4. Зависимости водопоглощения композиционных плитных материалов от доли добавки связующего ФФС

Композиционный материал	Зависимости предела прочности при статическом изгибе плит Y , % от доли добавки связующего x	Достоверность аппроксимации R^2
<i>При температуре сушики $T = 100^\circ\text{C}$</i>		
Плиты из хлопка	$Y = -2,4407x + 226,52$	0,9792
	$Y = 0,0151x^2 - 2,8741x + 228,14$	0,9819
	$Y = -9 \cdot 10^{-4}x^3 + 0,0573x^2 - 3,3502x + 228,94$	0,9825
Плиты из льна	$Y = -2,3641x + 205,91$	0,9787
	$Y = 0,0148x^2 - 2,7878x + 207,5$	0,9814
	$Y = -11 \cdot 10^{-3}x^3 + 0,0653x^2 - 3,3582x + 208,46$	0,9824
<i>При температуре сушики $T = 170^\circ\text{C}$</i>		
Плиты из хлопка	$Y = -2,9496x + 211,91$	0,9786
	$Y = 0,0385x^2 - 4,0541x + 216,05$	0,9905
	$Y = -17 \cdot 10^{-3}x^3 + 0,1158x^2 - 4,9267x + 217,51$	0,9919
Плиты из льна	$Y = -2,9047x + 195,3$	0,9766
	$Y = 0,039x^2 - 4,0249x + 199,5$	0,9892
	$Y = -13 \cdot 10^{-3}x^3 + 0,0963x^2 - 4,6705x + 200,59$	0,99

Таблица 5. Зависимости разбухания по толщине композиционных плитных материалов от доли добавки связующего ФФС

Композиционный материал	Зависимости разбухания по толщине плит Y , % от доли добавки связующего x	Достоверность аппроксимации R^2
<i>При температуре сушики $T = 100^\circ\text{C}$</i>		
Плиты из хлопка	$Y = -0,3256x + 23,738$	0,8725
	$Y = 0,0097x^2 - 0,6043x + 24,783$	0,9279
	$Y = -9 \cdot 10^{-4}x^3 + 0,0515x^2 - 1,076x + 25,575$	0,9587
Плиты из льна	$Y = -0,3098x + 17,655$	0,8687
	$Y = 0,0092x^2 - 0,5725x + 18,639$	0,9228
	$Y = -6 \cdot 10^{-4}x^3 + 0,0362x^2 - 0,8774x + 19,152$	0,937
<i>При температуре сушики $T = 170^\circ\text{C}$</i>		
Плиты из хлопка	$Y = -0,3065x + 19,852$	0,8586
	$Y = 0,0093x^2 - 0,572x + 20,847$	0,9144
	$Y = -1,2 \cdot 10^{-3}x^3 + 0,0633x^2 - 1,1821x + 21,872$	0,9718
Плиты из льна	$Y = -0,3244x + 14,107$	0,8824
	$Y = 0,0106x^2 - 0,6281x + 15,246$	0,9493
	$Y = -7 \cdot 10^{-4}x^3 + 0,0425x^2 - 0,9884x + 15,852$	0,9677

разной сложности, начиная от линейной зависимости. В работе получены зависимости, начиная с показательной функции и до полиномов четвертой степени, для каждой модели приведены значения достоверности аппроксимации.

На рис. 3–5 представлены зависимости физико-механических показателей для плит из отходов льна и хлопка на ФФС.

Прогнозировать физико-механические показатели для композиционных плит можно, используя разработанные регрессионные модели (см. табл. 3–5). Все зависимости имеют достоверность аппроксимации более 0,8. Увеличение степени полиномиальной зависимости выше двух дает повышение точности прогнозирования результата на 0,03–0,08 % (в зависимости от вида композита).

Композиты из отходов хлопка имеют более низкую, чем из отходов льна, прочность при статическом изгибе. Причина различий заключена в строении наполнителя. Волокна льна имеют сильно вытянутую веретенообразную форму с закрытыми заостренными концами. Значительно большая ориентация структурных элементов относительно оси в льняном волокне (по сравнению с хлопковым) объясняет более высокую прочность льна и меньшую способность удлиняться при растяжении.

Выводы. Увеличение доли добавки фенолформальдегидного связующего приводит к повышению прочности материала, снижению водопоглощения

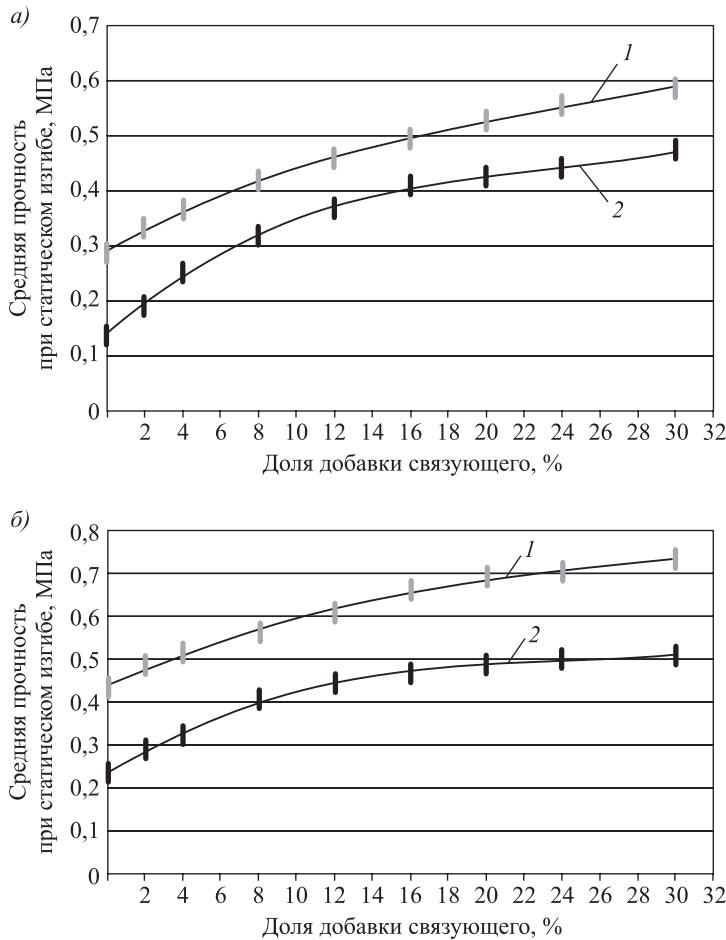


Рис. 3. Зависимость предела прочности при статическом изгибе от доли добавки связующего для плит из отходов льна и хлопка на фенолформальдегидном связующем при $T = 100^{\circ}\text{C}$ (а); при $T = 170^{\circ}\text{C}$ (б); для плит из отходов льна (1); для плит из отходов хлопка (2)

и разбухания по толщине. Эксплуатационный показатель в большей степени зависит от факторов производства композита – температуры сушки, доли добавки связующего и вида растительного наполнителя – лен/хлопок (при условии сопоставимости прочих технологических факторов). Разница в теплопроводности наполнителя объясняется строением дискретных растительных частиц – большим размером внутренней полости в элементарном волокне хлопка (в сравнении с волокном льна), а также тем, что часть пылевидных частиц льна имеет закрытые концы [12], а наличие закрытых пор значительно влияет на теплопроводность материала.

Прочность при статическом изгибе плит из хлопка, изготовленных при температуре сушки 100°C при добавке связующего 16 % и более, для плит из льна 8 % и более соответствует требованиям (прочность при статическом изгибе более 0,4 МПа), предъявляемым к теплоизоляционным материалам строительного назначения ГОСТ 4598–86.

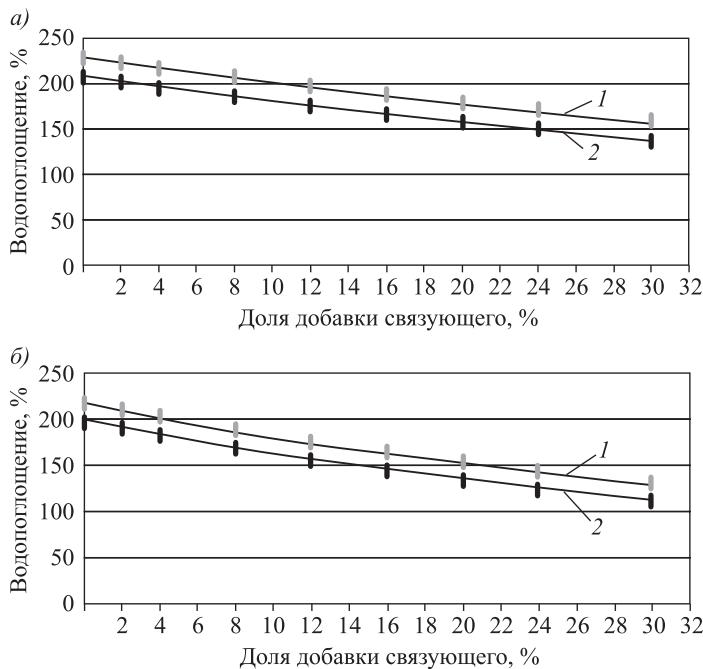


Рис. 4. Зависимость водопоглощения от доли добавки связующего для плит из отходов льна и хлопка на фенолформальдегидном связующем при $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а); при $T = 170\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б); для плит из отходов хлопка (1); для плит из отходов льна (2)

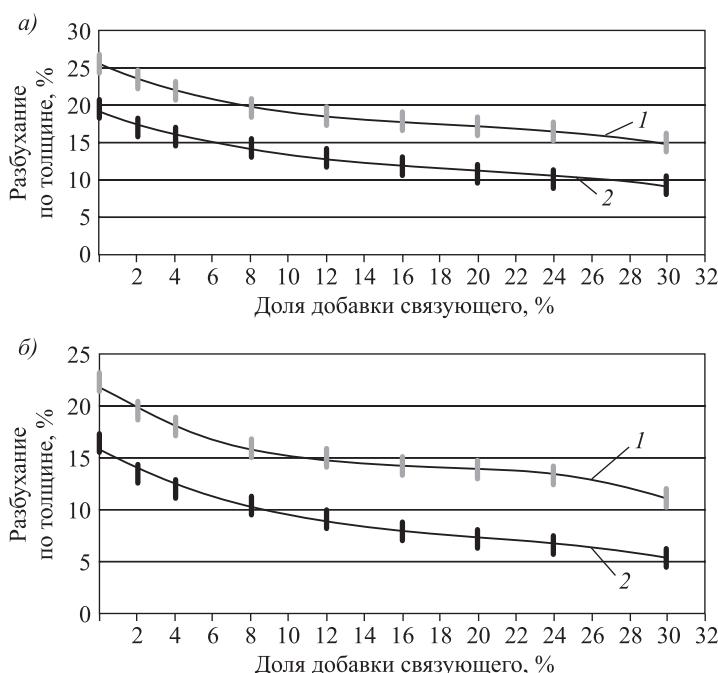


Рис. 5. Зависимость разбухания по толщине от доли добавки связующего для плит из отходов льна и хлопка на ФФС: при $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а); при $T = 170\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б); для плит из отходов хлопка (1); для плит из отходов льна (2)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dipak K. Raval, Sachin K. Vyas, Jitendra K. Parmar. A study on composites from phenol-formaldehyde-casein resin // Journal of Applied Polymer Science. 2010. Vol. 115. P. 2838–2846.
2. Кноп А., Шейб В. Фенольные смолы и материалы на их основе. М.: Химия, 1983. 280 с.
3. Tse-Hao Ko, Hsien-Lin Hu, Wen-Shyong Kuo, Su-How Wang. Enhancing thermal conductivity and physical properties of phenol-formaldehyde resin by adding VGCF during pyrolysis // Journal of Applied Polymer Science. 2006. Vol. 102. P. 1531–1538.
4. Goichi BEN, Akiko SHOJI. Pultrusion techniques of phenolic foam composite wrapped with glass fiber reinforced phenolic resin // Report of the Research Institute of Industrial Technology, Nihon University. 2005. No. 76. P. 1–10.
5. Ярцев В.П., Дорофеев А.М. Термоактивационные закономерности разрушения, деформирования и водопоглощения минераловатных плит // Стройт. науки. 2010. № 3. С. 604–607.
6. Masonry Iñigo Antepara, Zbyšek Pavlík, Jaromír Zumář, Milena Pavlíková, Robert Černý. Properties of hydrophilic mineral wool for desalination of historical // Materials science (MEDŽIAGOTYRA). 2016. Vol. 22. No. 1. P. 88–93.
7. Layth Mohammed, M.N.M. Ansari, Grace Pua, Mohammad Jawaid, M. Saifulis Islam. A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications // International Journal of Polymer Science. 2015. Vol. 2. P. 1–15.
8. Norulizani M.A., Paridah M.T., Anwar U.M.K., Mohd Nor M.Y., H'Ng P.S. Effects of fiber treatment on morphology, tensile and thermogravimetric analysis of oil palm empty fruit bunches fibers // Composites Part B: Engineering. 2013. Vol. 45. No. 1. P. 1251–1257.
9. Tawakkal I.S.M.A., Cran M.J., Bigger S.W. Effect of kenaf fibre loading and thymol concentration on the mechanical and thermal properties of PLA/kenaf/thymol composites // Industrial Crops and Products. 2014. Vol. 61. P. 74–83.
10. Shinoj S., Visvanathan R., Panigrahi S., Kochubabu M. Oil palm fiber (OPF) and its composites: a review // Industrial Crops and Products. 2011. Vol. 33. No. 1. P. 7–22.
11. Ku H., Wang H., Pattarachaiyakoop N., Trada M. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites // Composites Part B: Engineering. 2011. Vol. 42. No. 4. P. 856–873.
12. Сусоева И.В., Вахнина Т.Н., Титунин А.А., Асаткина Я.А. Показатели композитов из растительного сырья при изменениях температуры и влажности // Инж.-стройт. журн. 2017. № 3(71). С. 39–50.

Сусоева Ирина Вячеславовна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: i.susoeva@yandex.ru
Костромской государственный университет

Получено 03.04.18

Susoeva Irina Vyacheslavovna, PhD, Ass. Professor; E-mail: i.susoeva@yandex.ru
Kostroma State University, Russia

PHYSICOMECHANICAL INDICATORS HEAT-INSULATING MATERIALS FROM WASTE VEGETABLE RAW MATERIALS

Composite slabby materials with fillers from soft waste of wood and irretrievable waste of processing of a flax and cotton on the basis of a matrix from thermoreactive binding can

be used as construction material of heat-insulating appointment. Influence of a share of additive of phenol formaldehyde pitch (PFS) on indicators of composite slabby materials is considered. Results of physicomechanical indicators of slabby materials are given.

Key words: heat-insulating plates, durability, static bend, heat conductivity coefficient, water absorption, swelling, vegetable waste.

REFERENCES

1. Dipak K. Raval, Sachin K. Vyas, Jitendra K. Parmar. A study on composites from phenol-formaldehyde-casein resin. *Journal of Applied Polymer Science*. 2010. Vol. 115. Pp. 2838–2846.
2. Knop A., Sheyb V. Fenol'nye smoly i materialy na ikh osnove [Phenolic pitches and materials on their basis]. Moscow, 1983. 280 p. (in Russian)
3. Tse-Hao Ko, Hsien-Lin Hu, Wen-Shyong Kuo, Su-How Wang. Enhancing thermal conductivity and physical properties of phenol-formaldehyde resin by adding VGCF during pyrolysis. *Journal of Applied Polymer Science*. 2006. Vol. 102. Pp. 1531–1538.
4. Goichi BEN, Akiko SHOJI. Pultrusion techniques of phenolic foam composite wrapped with glass fiber reinforced phenolic resin. *Report of the Research Institute of Industrial Technology, Nihon University*. 2005. No. 76. Pp. 1–10.
5. Yartsev V.P., Doroфеев A.M. Termoaktivatsionnye zakonomernosti razrusheniya, deformirovaniya i vodopogloshcheniya mineralovatnykh plit [Thermoactivation regularities of destruction, deformation and water absorption of mineral-cotton plates]. *Stroitel'nye nauki* [Construction sciences]. 2010. No. 3. Pp. 604–607. (in Russian)
6. Masonry Iñigo Antepara, Zbyšek Pavlík, Jaromír Zumář, Milena Pavliková, Robert Černý. Properties of hydrophilic mineral wool for desalination of historical. *Materials science (MEDŽIAGOTYRA)*. 2016. Vol. 22. No. 1. Pp. 88–93.
7. Layth Mohammed, M.N.M. Ansari, Grace Pua, Mohammad Jawaid, M. Saiful Islam. A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications. *International Journal of Polymer Science*. 2015. Vol. 2. Pp. 1–15.
8. Norulizani M.A., Paridah M.T., Anwar U.M.K., Mohd Nor M.Y., H' Ng P.S. Effects of fiber treatment on morphology, tensile and thermogravimetric analysis of oil palm empty fruit bunches fibers. *Composites Part B: Engineering*. 2013. Vol. 45. No. 1. Pp. 1251–1257.
9. Tawakkal I.S.M.A., Cran M.J., Bigger S.W. Effect of kenaf fibre loading and thymol concentration on the mechanical and thermal properties of PLA/kenaf/thymol composites. *Industrial Crops and Products*. 2014. Vol. 61. Pp. 74–83.
10. Shinoj S., Visvanathan R., Panigrahi S., Kochubabu M. Oil palm fiber (OPF) and its composites: a review. *Industrial Crops and Products*. 2011. Vol. 33. No. 1. Pp. 7–22.
11. Ku H., Wang H., Pattarachaiyakoo P., Trada M. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*. 2011. Vol. 42. No. 4. Pp. 856–873.
12. Susoeva I.V., Vakhnina T.N., Titunin A.A., Asatkina Ja.A. Pokazateli kompozitov iz rastitel'nogo syr'ya pri izmeneniyakh temperatury i vlazhnosti [The performance of composites from vegetable raw materials with changes in temperature and humidity]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Magazine of Civil Engineering]. 2017. No. 3(71). Pp. 39–50. (in Russian)

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



УДК 628.334

Т.И. ХАЛТУРИНА, Е.Л. ВОЙТОВ, С.Г. ТРЕТЬЯКОВ, О.В. ЧУРБАКОВА

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ
СМЕШАННОГО ОСАДКА МАСЛОЭМУЛЬСИОННЫХ
И КИСЛОТНО-ЩЕЛОЧНЫХ СТОЧНЫХ ВОД**

Представлены результаты исследования кондиционирования осадков сточных вод предприятий металлообработки для последующей утилизации с учетом требований социальной экологии. Приведены результаты экспериментальных исследований по изучению процесса обработки осадков маслоЭмульсионных и кислотно-щелочных сточных вод отработанными растворами травления. Цель исследования: получение математической модели кондиционирования осадка отработанными растворами травления и изучение структуры, свойств и состава. Химический состав осадка был изучен термогравиметрическим методом на приборе NETZSCHSTA 449F1 и с помощью рентгенофазового анализа при использовании дифрактометра «D8-ADVANCE» немецкой фирмы «Bruker-ASX». При ротатабельном планировании эксперимента были получены математические модели для оптимизации и построения регулировочных диаграмм в программе Mathcad. Результаты экспериментальных исследований по методу Бокса–Хантера позволили определить оптимальные режимы обработки осадка: нефтесодержание – 40–70 %; температура – 20–30 °C; pH = 3–3,5; t = 10 мин.

Ключевые слова: осадок, сточные воды, кондиционирование, отработанный раствор кислоты, планирование эксперимента, оптимизация, регулировочные диаграммы, термогравиметрический анализ, рентгенофазовый метод.

В процессе очистки сточных вод предприятий металлообработки образуется осадок в виде колloidной суспензии, обладающей плохими водоотдающими свойствами. Известно, что скорость и полнота выделения скоагулированной взвеси определяется структурной прочностью, плотностью хлопьев и их адгезионной способностью [1]. Обезвоживание и утилизация осадков является сложной проблемой, не получившей еще окончательного решения [2, 3]. Обработка осадков усложняется тем, что они имеют большие объемы, высокую влажность, неоднородный состав и содержат органические вещества. Для успешного обезвоживания необходима предварительная подготовка – кондиционирование [4–6]. Целью настоящей работы являлось исследование возможности снижения объема осадка при кондиционировании отра-

© Халтурина Т.И., Войтов Е.Л., Третьяков С.Г., Чурбакова О.В., 2018

ботанным раствором H_2SO_4 , плотность которого составляла $\rho = 1,173 \text{ г/см}^3$, для получения регенерированного раствора $Al_2(SO_4)_3$ и использования его в процессе электрообработки маслозмульсионных сточных вод. Экспериментальные исследования проводились по методу Бокса–Хантера [7, 8]. В качестве переменных были взяты: z_1 – замасленность осадка, %; z_2 – температура при кондиционировании t , $^{\circ}\text{C}$; z_3 – pH; z_4 – время реакции, мин. В качестве функции отклика: y_1 – остаточный объем осадка, %; y_2 – доза кислоты, г/г.

Основной уровень, интервалы варьирования и границы области исследования при обработке отработанным раствором, содержащим H_2SO_4 , приведены в табл. 1.

Значимость коэффициентов определяли по критерию Стьюдента для $p = 0,05$. Адекватность уравнений регрессии проверялась по критерию Фишера.

Уравнения регрессии в безразмерном масштабе процесса кондиционирования осадка отработанным кислым раствором:

– для остаточного объема осадка

$$y_1 = 15,08 - 10,28 \cdot x_1 + 8,62 \cdot x_2 + 13,2 \cdot x_3 + 7,24 \cdot x_4 - 3,21 \cdot x_1x_2 - 2,59 \cdot x_1x_3 + 6,59 \cdot x_1x_4 - 16,23 \cdot x_2x_3 + 7,06 \cdot x_2x_4 - 2,51 \cdot x_3x_4 + 15,37 \cdot x_1^2 + 7,37 \cdot x_2^2 + 9,82 \cdot x_3^2 + 2,65 \cdot x_4^2;$$

– для дозы кислоты

$$y_2 = 1,13 + 0,11 \cdot x_1 - 0,07 \cdot x_2 - 0,37 \cdot x_3 + 0,003 \cdot x_4 + 0,005 \cdot x_1x_2 - 0,07 \cdot x_1x_3 + 0,04 \cdot x_1x_4 + 0,04 \cdot x_2x_3 - 0,04 \cdot x_2x_4 + 0,058 \cdot x_3x_4 - 0,06 \cdot x_1^2 - 0,13 \cdot x_2^2 - 0,15 \cdot x_3^2 + 0,04 \cdot x_4^2.$$

Уравнения регрессии процесса кондиционирования осадка отработанным кислым раствором в натуральном масштабе:

– для остаточного объема осадка

$$y_1 = 338 - 8,9 \cdot z_1 + 0,096 \cdot z_2 + 5,1 \cdot z_3 - 9,9 \cdot z_4 - 0,014 \cdot z_1 \cdot z_2 - 0,17 \cdot z_1 \cdot z_3 + 0,088 \cdot z_1 \cdot z_4 - 1,1 \cdot z_2 \cdot z_3 + 0,094 \cdot z_2 \cdot z_4 - 0,5 \cdot z_3 \cdot z_4 + 0,068 \cdot z_1^2 + 0,033 \cdot z_2^2 + 9,8 \cdot z_3^2 + 0,11 \cdot z_4^2;$$

– для дозы кислоты

$$y_2 = 0,024 + 0,039 \cdot z_1 + 0,043 \cdot z_2 + 0,45 \cdot z_3 - 0,11 \cdot z_4 + 0,00002 \cdot z_1 \cdot z_2 - 0,0047 \cdot z_1 \cdot z_3 + 0,00053 \cdot z_1 \cdot z_4 + 0,0027 \cdot z_2 \cdot z_3 - 0,0005 \cdot z_2 \cdot z_4 + 0,012 \cdot z_3 \cdot z_4 - 0,00027 \cdot z_1^2 - 0,00058 \cdot z_2^2 - 0,15 \cdot z_3^2 + 0,0016 \cdot z_4^2.$$

Таблица 1. Факторы и их интервалы варьирования

	Замасленность, %	Температура, $^{\circ}\text{C}$	pH	Время контакта, мин
Δ	15	15	1	5
z_0	55	40	3	20
+1	70	55	4	25
-1	40	25	2	15
+2	85	70	5	30
-2	25	10	1	10

По уравнениям регрессии были построены графические зависимости, представленные на рис. 1–5.

По уравнениям регрессии была проведена оптимизация по диссociативно-шаговому методу для получения регулировочных диаграмм [9]. Регулировочные диаграммы представлены на рис. 6.

Как видно из регулировочных диаграмм, с увеличением замасленности осадка область совместной оптимальности смещается в сторону как большего значения величины pH, так и температуры.

В работе были определены свойства исходного осадка ООО «КраMЗ», которые приведены в табл. 2.

При сравнении термограммы с термограммой исходного осадка видно, что увеличивается количество термоэффектов. Так, наблюдается 5 эндоэффектов и 4 экзоэффекта, что указывает на изменение состава осадка и его

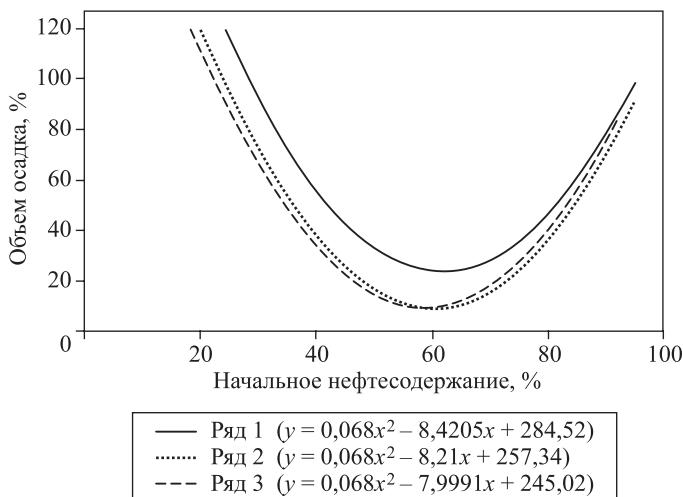


Рис. 1. Зависимость объема осадка, % от начального нефтесодержания осадка (z_1), %

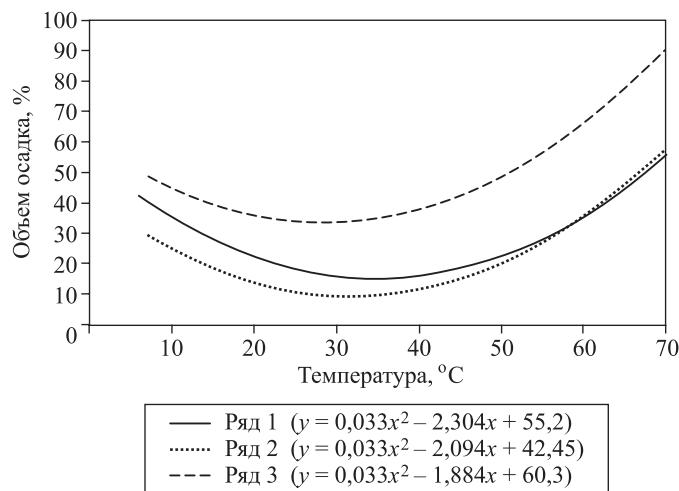


Рис. 2. Зависимость объема осадка, % от температуры кондиционирования (z_2), °C

структуры. Термоэффект при $t = 165,3$ °C характерен для дегидратации гидроксидов алюминия. Эндоэффекты при $t = 306,4$ и $347,9$ °C связаны с удалением конституционной воды и образованием бёмита ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$). Так, термоэффект при $t = 480$ °C показывает дегидратацию и разложение образовавшегося бёмита с непосредственным переходом в безводный окисел $\gamma = \text{Al}_2\text{O}_3$.

Экзоэффекты при $t = 409,5$ и $565,5$ °C указывают на горение масел и возможное наличие $\text{KAl}_3[\text{SO}_4]_2(\text{OH})_6$. Эндоэффект при $t = 778,5$ °C характерен для разложения карбонатов.

Для определения состава осадка был выполнен термогравиметрический анализ на приборе NETZSCHSTA 449F1, в диапазоне 30/20,0

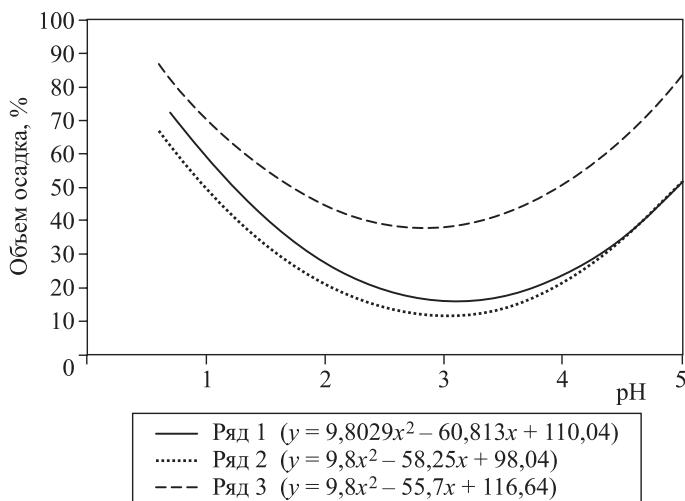


Рис. 3. Зависимость объема осадка, % от pH (z_3)

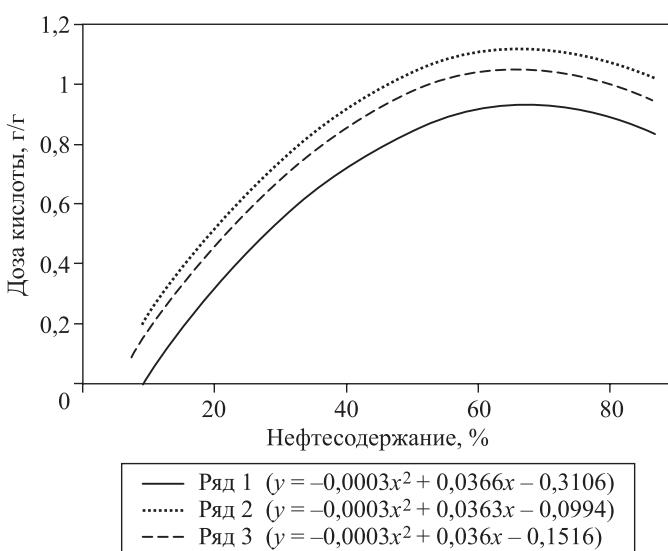


Рис. 4. Зависимость дозы кислоты, г/г от начального нефтесодержания осадка (z_1), %

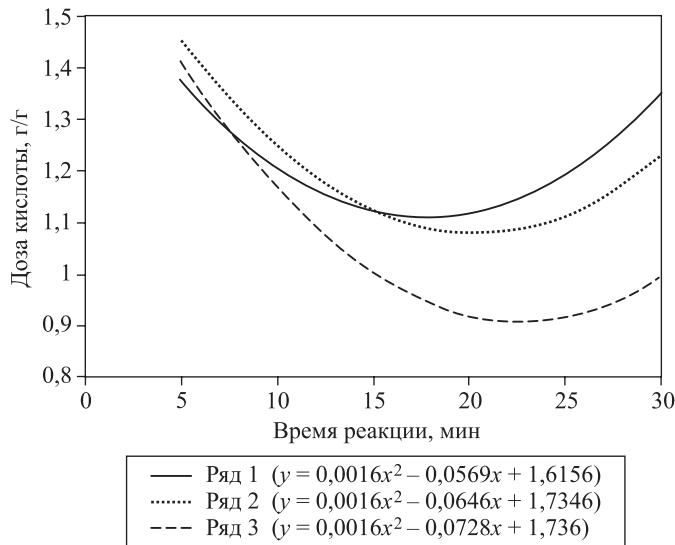


Рис. 5. Зависимость дозы кислоты, г/г от времени реакции (z_4), мин

(к/мин/1000) в режиме ДСК–ТГ, в атмосфере A_2 . Термограмма исходного осадка маслоэмulsionных и кислотно-щелочных сточных вод представлена на рис. 7, 8.

Рентгенофазовый анализ осадка был выполнен для более точного определения состава осадка, обработанного отработанным кислым раствором при использовании дифрактометра «D8-ADVANCE» немецкой фирмы «Bruker-ASX» (рис. 9).

На дифрактограмме видны линии с $d = 1,876$; $d = 2,05$; $d = 2,09$; $d = 2,24$; $d = 3,04$, которые указывают на наличие $CaCO_3$, линии с $d = 2,45$; $d = 2,39$; $d = 2,24$; $d = 1,99$; $d = 1,87$; $d = 1,8$; $d = 1,68$; $d = 1,6$ характерны для $CaSO_4$. Линии с $d = 3,35$; $d = 3,43$ связаны с кварцитом SiO_2 . Наличие гиббсита подтверждается линиями с $d = 4,83$; $d = 4,38$; $d = 3,18$; $d = 2,49$; $d = 2,24$; $d = 1,93$; $d = 1,68$.

Таким образом, проведенный рентгенофазовый анализ позволил более точно определить состав осадка. При сравнении дифрактограмм видно, что

Таблица 2. Свойства осадков

Вид осадка	ρ , г/см ³	W , %	Сухой остаток после просушки- вания, г/дм ³	Прокал. остаток, г/дм ³		Потери при прокал., г/дм ³		Зольность, %		Замасленность, %	Удельное сопротивление фильтра, см/г
				450 °C	800 °C	450 °C	800 °C	450 °C	800 °C		
Осадок СВ, после обработки кислотой	1,076	92,9318	76,085	53	36	23	40	69,51	47,21	30,22	$231,8 \cdot 10^{10}$
Исходный осадок СВ	0,997	95	49,85	16,38	15,27	33,46	34,57	32,86	30,64	67,12	$155,7 \cdot 10^{10}$

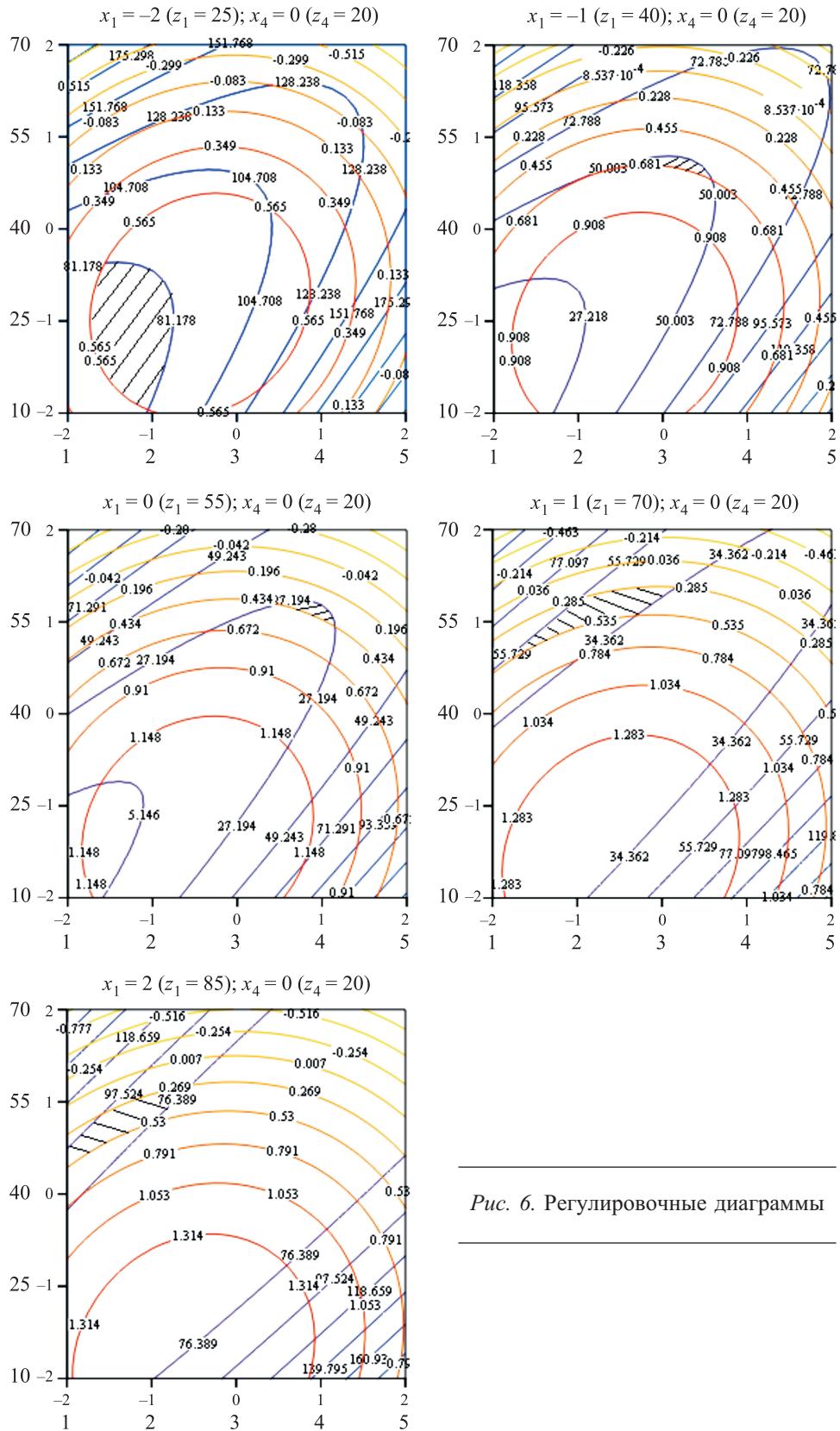


Рис. 6. Регулировочные диаграммы

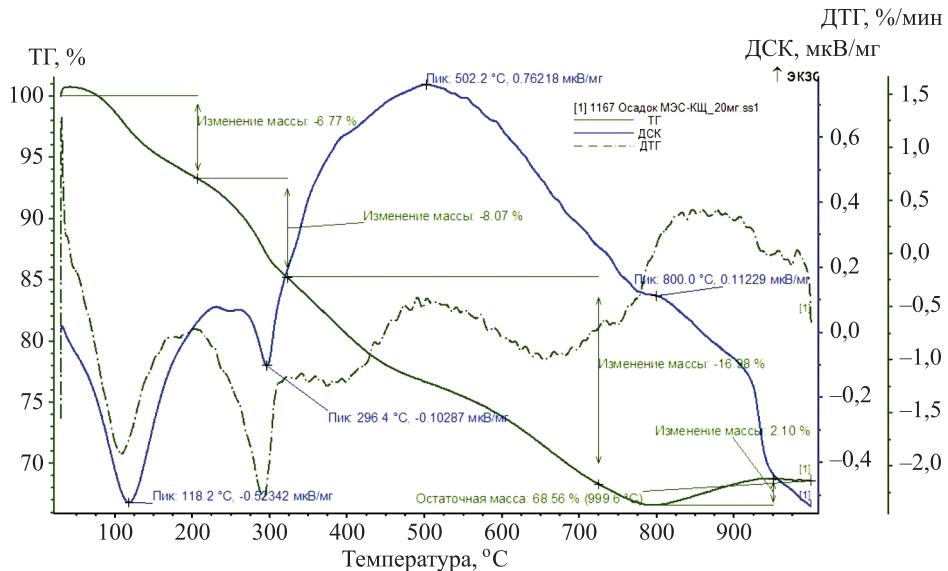


Рис. 7. Исходный осадок МЭС+КШ

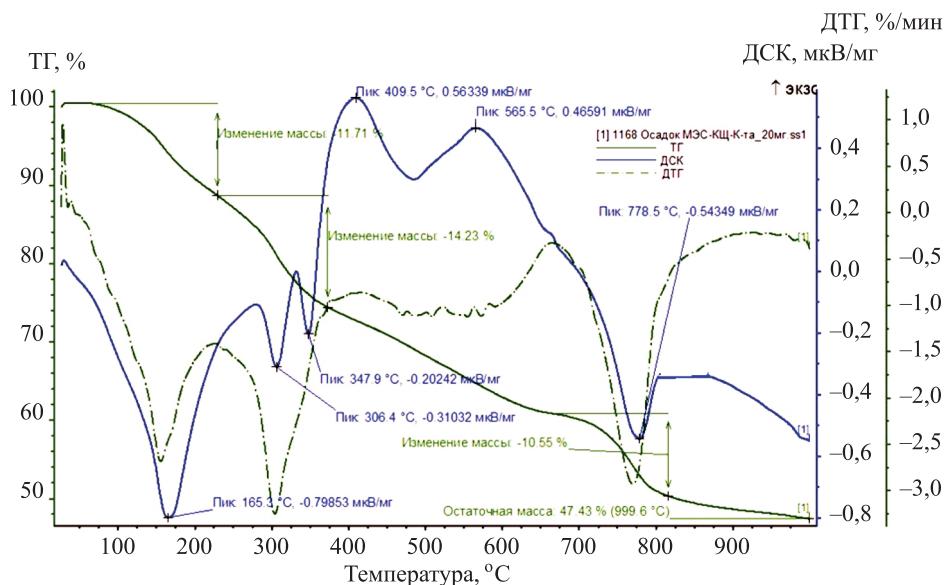
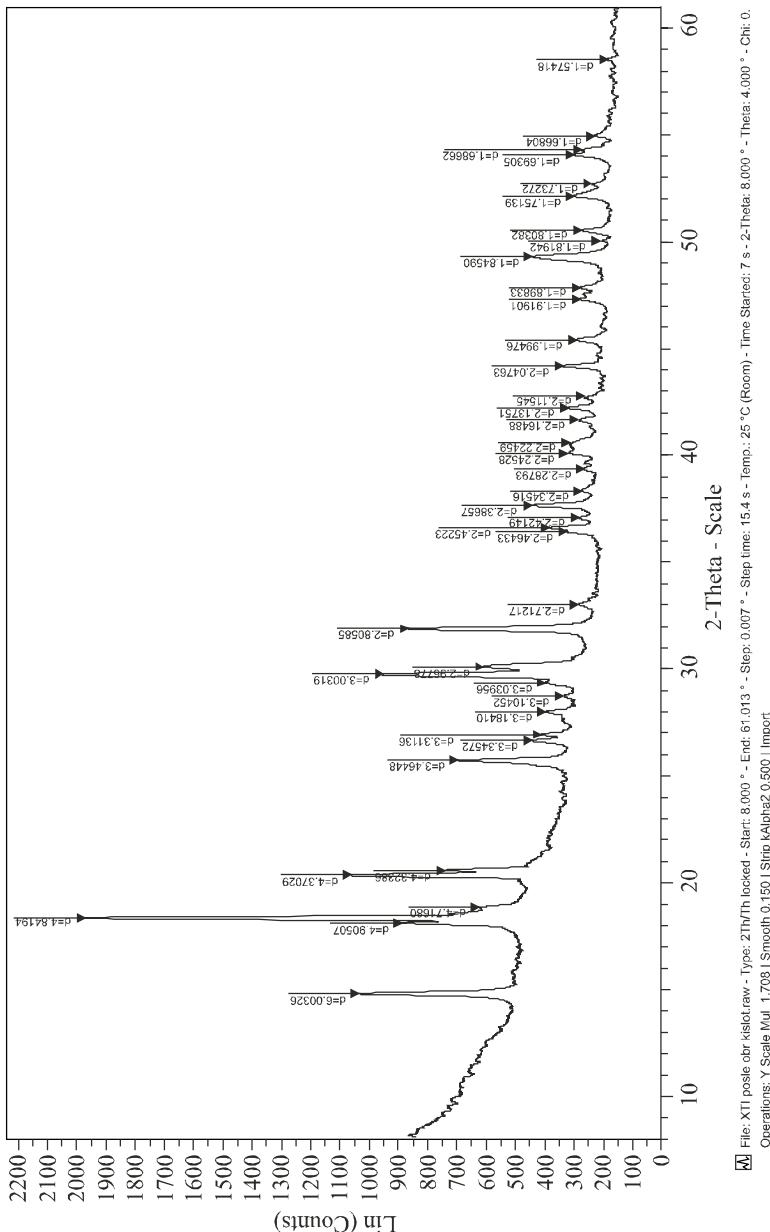


Рис. 8. Термограмма осадка после обработки раствором кислоты

осадок после кондиционирования отработанным кислым раствором имеет несколько более кристаллическую структуру.

Выводы. Изучены свойства осадка после обработки его отработанным кислым раствором. Установлено, что удельное сопротивление осадка фильтрации увеличилось, но при этом значительно (более чем в 2 раза) снизилось нефтесодержание, что благоприятно для последующей утилизации. Определен состав осадка после обработки его отработанным кислым раствором термогравиметрическим методом анализа. Показано, что на термограмме наблюдается увеличение количества термоэффектов. Так, наблюдается 5 эндоэффектов и 4 экзоэффекта, что указывает на изменение состава



File: XRD postc olor.ksl raw - Type: 2h/H/Ih locked - Start: 8.000 ° - End: 61.013 ° - Step: 0.007 ° - Step time: 15.4 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 7 s - 2-Theta: 8.000 ° - Theta: 4.000 ° - Ch: 0.
Operations: Y Scale Mu 1.708 | Smooth 0.150 | Strip kappa/2.500 | Import

Рис. 9. Дифрактограмма осадка после обработки отработанным кислым раствором

осадка и его структуры. Термоэффект при $t = 165,3$ °C характерен для дегидратации гидроксидов алюминия. Эндоэффекты при $t = 306,4$ и $347,9$ °C связаны с удалением конституционной воды и образованием бёмита ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$). Так, термоэффект при $t = 480$ °C указывает на дегидратацию и разложение образовавшегося бёмита с непосредственным переходом в безводный окисел $\gamma = \text{Al}_2\text{O}_3$. Экзоэффекты при $t = 409,5$ и $565,5$ °C указывают на горение масел и возможное наличие $\text{KAl}_3[\text{SO}_4]_2(\text{OH})_6$. Эндоэффект при $t = 778,5$ °C характерен для разложения карбонатов [10]. Получены данные по определению структуры и состава осадка рентгенофазовым методом анализа при использовании дифрактометра «D8-ADVANCE» немецкой фирмы «Bruker-ASX». Показано, что видны линии с $d = 1,876$; $d = 2,05$;

$d = 2,09$; $d = 2,24$; $d = 3,04$, которые указывают на наличие CaCO_3 , линии с $d = 2,45$; $d = 2,39$; $d = 2,24$; $d = 1,99$; $d = 1,87$; $d = 1,8$; $d = 1,68$; $d = 1,6$ характерны для CaSO_4 . Линии с $d = 3,35$; $d = 3,43$ связаны с кварцитом SiO_2 . Наличие гиббсита подтверждается линиями с $d = 4,83$; $d = 4,38$; $d = 3,18$; $d = 2,49$; $d = 2,24$; $d = 1,93$; $d = 1,68$. Таким образом, проведенный рентгенофазовый анализ позволил более точно определить состав осадка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Терещук А.И. Исследование и переработка осадков сточных вод. Львов: Вышш. шк., 1988. С. 147.
2. Туровский И.С. Обработка осадка сточных вод. М.: Стройиздат, 1988. 256 с.
3. Халтурина Т.И., Стәфейчук Л.В., Пчелкин А.Г., Пазенко Т.Я. Исследование возможности химического кондиционирования осадка // Журнал прикладной химии. 1980. Т. 53. № 12. С. 2747–2749.
4. Халтурина Т.И., Хомутова Ю.В., Чурбакова О.В. Интенсификация процесса обезвоживания осадков металлообрабатывающих предприятий // Изв. вузов. Строительство. 2004. № 12. С. 69–72.
5. Халтурина Т.И., Орлова М.М., Высотина М.А., Чурбакова О.В. Влияние присадочных материалов на свойства осадков нефтесодержащих сточных заводов сельскохозяйственного машиностроения // Вестн. Красноярск. гос. аграрн. ун-та. 2017. № 7. С. 62–71.
6. Аксенов В.И., Царев Н.С., Николаенко Е.В., Ничкова И.И. Обработка осадков сточных вод гальванических производств // Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. 2017. № 1. С. 62–66.
7. Батрак А.П. Планирование и организация эксперимента: учеб. пособие. Красноярск: ИПЦ СФУ, 2010. 60 с.
8. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии. М.: Вышш. шк., 1978. С. 99–114.
9. Вознесенский В.А., Ковальчук А.Ф. Принятие решений по статистическим моделям. М.: Статистика, 1978. 192 с.
10. Иванова В.П., Касатов Б.П., Красавина Т.Н., Розинова Е.Л. Термический анализ минералов и горных пород. Л.: Недра, 1974. С. 399.

Халтурина Тамара Ивановна, канд. хим. наук, проф.;
E-mail: thal1965@yandex.ru

Инженерно-строительный институт СФУ, г. Красноярск

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

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Третьяков Сергей Геннадьевич, асп.;

E-mail: thal1965@yandex.ru

Инженерно-строительный институт СФУ, г. Красноярск

Чурбакова Ольга Викторовна, канд. техн. наук, доц.;

E-mail: ochurbacova@mail.ru

Инженерно-строительный институт СФУ, г. Красноярск

Получено после доработки 25.04.18

Khalturina Tamara Ivanovna, PhD, Professor; E-mail: thal1965@yandex.ru
School of Engineering and Construction of SFU, Krasnoyarsk, Russia

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

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

Tret'yakov Sergey Gennad'evich, Post-graduate Student;

E-mail: tha11965@yandex.ru

School of Engineering and Construction of SFU, Krasnoyarsk, Russia

Churbakova Ol'ga Viktorovna, PhD, Ass. Professor;

E-mail: ochurbakova@mail.ru

School of Engineering and Construction of SFU, Krasnoyarsk, Russia

OPTIMIZATION OF THE CONDITIONING PROCESS OF MIXED OIL-EMULSION SEDIMENT AND ACID-ALKALI WASTEWATER

The article is devoted to solving the problems of conditioning sewage sludge of metalworking enterprises for further utilization, taking into account the requirements of social ecology. The results of experimental studies on the processing of oil-emulsion precipitation and acid-alkali wastewater by spent etching solutions are presented. The purpose of the study was to obtain a mathematical model for conditioning the sediment with spent etching solutions and to study the structure, properties, and composition of the sediment. The chemical composition of the sediment was studied by the thermogravimetric method on the NETZSCH STA 449F1 instrument and by X-ray diffraction analysis using D8-ADVANCE diffractometer, the German company Bruker-ASX. With rotational design of the experiment, mathematical models were obtained for optimization and construction of adjustment diagrams in the Mathcad program. The results of experimental studies using the Box-Hunter method allowed us to determine the optimal regimes for treating the sediment: oil content – 40–70 %; temperature – 20–30 °C; pH = 3–3,5; $t = 10$ min.

Key words: sediment, sewage, conditioning, spent acid solution, experiment planning, optimization, control diagrams, thermogravimetric analysis, X-ray diffraction method.

REFERENCES

1. Tereleshchuk A.I. Issledovanie i pererabotka osadkov stochnykh vod [Research and processing of sewage sludge]. Lvov, Higher School, 1988. P. 147. (in Russian)
2. Turovskiy I.S. Obrabotka osadka stochnykh vod [Treatment of sewage sludge]. Moscow, Stroyizdat, 1988. 256 p. (in Russian)
3. Khalturina T.I., Stafeychuk L.V., Pchelkin A.G., Pazenko T.Ya. Issledovanie vozmozhnosti khimicheskogo konditsionirovaniya osadka [Investigation of the possibility of chemical conditioning of precipitate]. Zhurnal prikladnoy khimii [Journal of Applied Chemistry]. 1980. Vol. 53. No. 12. Pp. 2747–2749. (in Russian)
4. Khalturina T.I., Khomutova Yu.V., Churbakova O.V. Intensifikatsiya protsesssa obezvozhivaniya osadkov metalloobrabatyvayushchikh predpriyatiy [Intensification of the process of sludge dewatering of metalworking enterprises]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2004. No. 12. Pp. 69–72. (in Russian)
5. Khalturina T.I., Orlova M.M., Vysotina M.A., Churbakova O.V. Vliyanie prisadochnykh materialov na svoystva osadkov neftesoderzhashchikh stochnykh zavodov sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya [Influence of filler materials on the properties of sediments of oily effluent from agricultural machinery plants]. Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University]. 2017. No. 7. Pp. 62–71. (in Russian)

6. Aksenov V.I., Tsarev N.S., Nikolaenko E.V., Nichkova I.I. Obrabotka osadkov stochnykh vod gal'vanicheskikh proizvodstv [Treatment of sewage sludge from galvanic plants]. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the South Ural State University]. 2017. No. 1. Pp. 62–66. (in Russian)
 7. Batrak A.P. Planirovaniye i organizatsiya eksperimenta: uchebnoe posobie [Planning and organization of the experiment: a manual]. Krasnoyarsk, CPI SFU, 2010. 60 p. (in Russian)
 8. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. Optimizatsiya eksperimenta v khimii i khimicheskoy tekhnologii [Optimization of the experiment in chemistry and chemical technology]. Moscow, Higher School, 1978. Pp. 99–114. (in Russian)
 9. Voznesenskiy V.A., Koval'chuk A.F. Prinyatie resheniy po statisticheskim modeljam [Decision-making on statistical models]. Moscow, Statistics, 1978. 192 p. (in Russian)
 10. Ivanova V.P., Kasatov B.P., Krasavina T.N., Rozanova E.L. Termicheskiy analiz mineralov i gornykh porod [Thermal analysis of minerals and rocks]. Leningrad, Nedra, 1974. 399 p. (in Russian)
-

УДК 697.34 : 697.4

Т.А. РАФАЛЬСКАЯ, Т.Л. РОХЛЕЦОВА, С.М. ТЮСОВ

ЦЕНТРАЛЬНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ БЕЗ ВЕРХНЕЙ СРЕЗКИ: ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Рассмотрены проблемы обеспечения качественного регулирования систем теплоснабжения и возможность перехода на графики с более низкой расчетной температурой без верхней срезки. В области низких температур наружного воздуха оба графика обеспечивают допустимую температуру внутреннего воздуха в жилых зданиях. При переходе на график с более низкой расчетной температурой без верхней срезки область качественного регулирования тепловой нагрузки смещается в область более низких температур наружного воздуха и становится более длительной по продолжительности по сравнению с применением графика с более высокой расчетной температурой, но со срезкой. Однако при низких температурах нагрузка второй ступени теплообменника горячего водоснабжения невелика, что позволяет обеспечить приемлемую внутреннюю температуру и в графике с верхней срезкой, при меньшем расходе сетевой воды. Наиболее неблагоприятный внутренний температурный режим наблюдается в пределах точки излома температурного графика, когда максимальна нагрузка второй ступени подогревателя СГВ. При этом в графике без срезки точка излома приходится на область более низких температур наружного воздуха, когда теплопотери еще достаточно велики и не удается обеспечить даже допустимые значения внутренней температуры в жилых зданиях.

Ключевые слова: система теплоснабжения, тепловая сеть, срезка температурного графика, температурный режим помещений, центральное качественное регулирование.

Введение. Центральное качественное регулирование тепловой нагрузки применяется в отечественных системах теплоснабжения с середины прошлого века. До начала 90-х г. XX в. качественное регулирование в большинстве случаев позволяло обеспечивать потребителей теплотой требуемых параметров и в необходимых количествах [1]. Для систем централизованного теплоснабжения от ТЭЦ в основном был принят температурный график 150/70 °C, поскольку этот график обеспечивает оптимальный теплофикационный режим работы при минимальных затратах на магистральные тепловые сети.

В период экономического кризиса 90-х г. XX в. осуществление центрального качественного регулирования на теплоисточниках во многих городах практически прекратилось. Почти все системы теплоснабжения страны стали работать со значительным «недотопом» (недогревом сетевой воды в подающей магистрали до нормативных величин), вызванным износом тепловых сетей, остановкой пиковых источников теплоты [2–10].

Применение верхней срезки температурного графика, а также поднятие нижней срезки для обеспечения температуры горячей воды в местах водоразбора не менее 60 °C в соответствии с СанПиН 2.1.4.2496–09 привело к резко-

му сокращению области центрального качественного регулирования для большинства городов Российской Федерации.

В таблице приведены сведения о температурных графиках и срезках в разных городах России и определены области качественного регулирования в процентах по температурным графикам центрального регулирования, а также по продолжительности стояния температур, соответствующих областям качественного регулирования за отопительный период.

В последнее время имеется тенденция возврата к центральному регулированию без верхней срезки, но с более низкой расчетной температурой воды в подающей магистрали теплосети [1, 7–10] по «примеру» зарубежных низкотемпературных систем теплоснабжения [11–15], в которых, однако, не реализован принцип качественного регулирования тепловой нагрузки [16]. В работах [7–10] сравнивается стоимость электрической энергии на перекачку повышенного расхода теплоносителя и снижение потерь тепловой энергии при пониженном температурном графике, но не учитываются режимы работы тепловой сети с точки зрения потребителей, т.е. возможности обеспечения оптимальной внутренней температуры воздуха. Переход на низкотемпературное теплоснабжение, помимо увеличения расчетных расходов сетевой воды, также сдвигнет точку излома температурного графика в область более низких наружных температур. Для сравнения в таблице

Анализ температурных графиков тепловых сетей

№ п/п	Город	Расчетный температу- рный график, °C	Верхняя срезка, °C	Темпе- ратура холодной пяти- дневки, °C	Доля качественного регулирования по температурному графику, %		Доля качественного регулирования по продолжитель- ности стояния температур, %	
					со срезкой	без срезки	со срезкой	без срезки
1	Москва	150/70	130	-25	63,6	75,8	67,8	57,3
2	Новосибирск	150/70	114	-37	37,8	55,6	49,6	35,8
3	Екатеринбург	150/70	120	-32	50,0	67,5	63,3	54,0
4	Казань	130/65	115	-31	53,8	64,1	52,9	43,8
5	Красноярск	150/70	130	-37	60,0	71,1	61,8	54,2
6	Курган	115/70	100	-36	29,5	52,3	41,7	35,4
7	Нижний Новгород	150/70	110	-31	35,9	61,5	70,8	36,7
8	Омск	150/70	116	-37	46,7	64,4	58,1	52,8
9	Тюмень	150/70	121	-35	48,8	67,4	59,0	52,2
10	Улан-Удэ	136/70	110	-35	44,2	60,5	45,6	56,3
11	Уфа	150/70	130	-33	61,0	73,2	69,2	60,8
12	Ростов-на-Дону	150/70	115	-19	48,1	70,4	65,5	54,7
13	Сургут	150/70	112	-43	39,2	58,8	45,3	38,2
14	Томск	150/70	125	-39	53,2	68,1	61,7	53,1
15	Самара	130/70	115	-30	55,3	65,8	55,6	47,8

показаны диапазоны качественного регулирования для графиков низкотемпературного теплоснабжения без верхней срезки, с расчетной температурой в подающей магистрали, равной температуре верхней срезки. При переходе на низкотемпературное теплоснабжение область качественного регулирования охватывает больший интервал наружных температур. Однако при низкотемпературном теплоснабжении качественное регулирование соответствует более низким температурам наружного воздуха, чем для графиков с верхней срезкой. Для большинства городов РФ чем ниже наружные температуры, тем меньше продолжительность их стояния. Поэтому продолжительность центрального качественного регулирования при низкотемпературном теплоснабжении без верхней срезки в большинстве случаев уменьшилась (см. таблицу).

Анализ возможности перехода к центральному качественному регулированию без верхней срезки температурного графика на примере г. Новосибирска. В настоящее время в СЦТ Новосибирска принят температурный график центрального регулирования 150/70 °C, с верхней срезкой на 114 °C и нижней срезкой 75 °C. При применении верхней срезки расчетной остается температура воды в подающей магистрали теплосети, соответствующая исходному высокотемпературному графику ($t_{1p} = 150$ °C). По температурному перепаду 150/70 °C определяются расчетный расход воды в теплосети (на нужды отопления и вентиляции), гидравлические режимы работы в течение отопительного периода, температура наружного воздуха, соответствующая точке излома температурного графика (нижней срезке). Максимальный (расчетный) расход сетевой воды соответствует точке излома температурного графика. Положение точки излома $t_{ни}$ определяется расчетной температурой для проектирования отопления $t_{но}$ и расчетной температурой в теплосети t_{1p} . В отопительном сезоне 2017/18 г. $t_{ни} = -4$ °C. При этой температуре наиболее существенно влияние системы горячего водоснабжения на систему отопления [17–19], поскольку в период максимального водопотребления система отопления может не получать необходимого количества теплоты.

Верхняя срезка соответствует диапазону низких температур наружного воздуха, когда нагрузка горячего водоснабжения в большей степени обеспечивается за счет теплоты обратной сетевой воды, поэтому имеется возможность компенсировать снижение температуры воды в теплосети увеличением расхода, не превышая при этом расчетного значения.

На рис. 1 показан расчетный и фактический температурный график отопительного сезона 2017/18 г. Калининского вывода ТЭЦ-4 г. Новосибирска.

При переходе на температурный график качественного регулирования 130/70 °C без верхней срезки изменение (снижение) расчетной температуры вызовет увеличение расхода воды в теплосети; точка излома температурного графика при нижней срезке 75 °C будет соответствовать наружной температуре $t_{ни} = -8$ °C. Исследование, проведенное в [19], показало, что нижняя срезка температурного графика оказывает большее влияние на внутреннюю температуру помещений, чем верхняя, из-за работы теплообменников горячего водоснабжения. Таким образом, при существующем оборудовании тепловых пунктов при более низкой наружной температуре система отопления

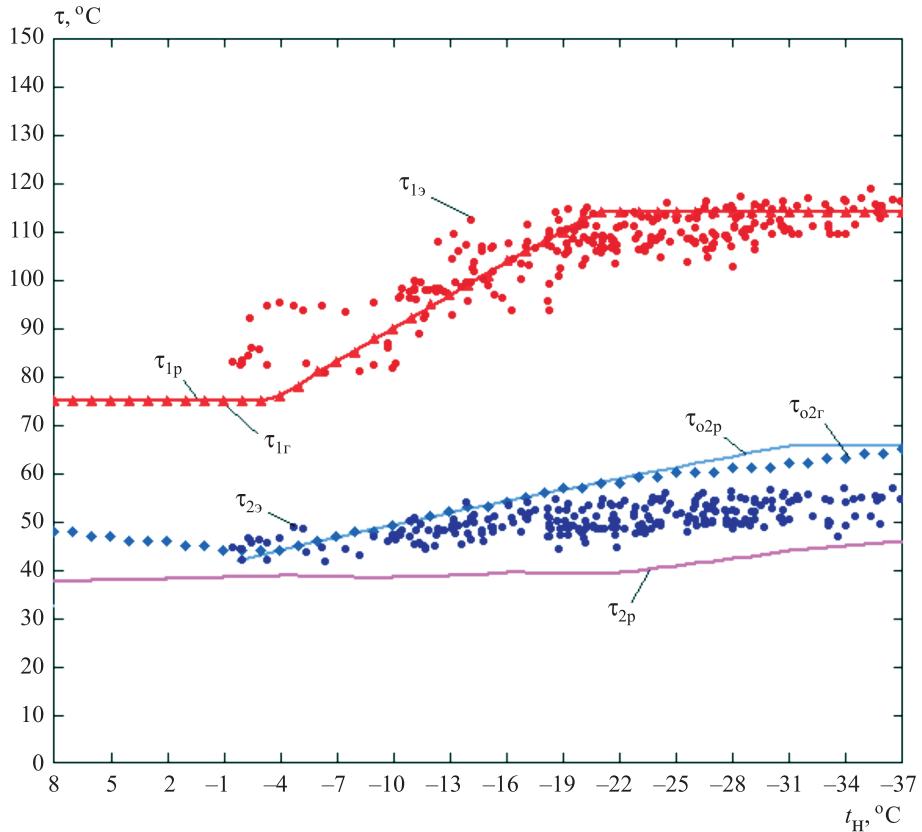


Рис. 1. Температурный график Калининского вывода ТЭЦ-4 г. Новосибирска
 τ_{1p} – расчетная температура в подающей магистрали теплосети; τ_{1r} – температура в подающей магистрали теплосети, принятая по графику ТЭЦ; τ_{1s} – фактическая (эксплуатационная) температура в подающей магистрали теплосети; τ_{o2p} – расчетная температура в обратной магистрали системы отопления; τ_{o2r} – температура в обратной магистрали, принятая по графику ТЭЦ; τ_{2p} – расчетная температура в обратной магистрали теплосети в режиме максимального водоразбора; τ_{2s} – фактическая (эксплуатационная) температура в обратной магистрали теплосети

будет недополучать необходимое количество теплоты в период максимального водоразбора. В настоящей работе сделана попытка определить, насколько снижение тепловой мощности системы отопления и аккумулирующая способность наружных ограждений повлияют на тепловой режим помещений.

Для ответа на этот вопрос были произведены расчеты режимов работы теплосети по методике, подробно изложенной в [5].

Расход теплоты, поступающей в систему отопления:

$$Q_o = \frac{(\tau_1 - t_h) \cdot Q_{omax}}{t_{bp} - t_{ho} + \frac{0.5+u}{1+u} \cdot \frac{\delta\tau_o}{\Phi_o} + \Delta t_o \cdot \left(\frac{Q_{op}}{Q_o} \right)^{0.2} \cdot \left(\frac{t_{bp} - t_{ho}}{t_{bp} - t_h} \right)}, \quad (1)$$

где t_{bp} – расчетная температура внутреннего воздуха, °C;

t_{ho} , t_h – расчетная и текущая температура наружного воздуха, °C;

$u = \frac{\tau_1 - \tau_{o3}}{\tau_{o3} - \tau_{o2}}$ – коэффициент смешения системы отопления;

$\delta\tau_o = \tau_1 - \tau_{o2}$ – расчетная разность температур сетевой воды, °C;

$\Delta t_o = \frac{\tau_{o3} + \tau_{o2}}{2} - t_{bp}$ – температурный напор при смешении воды в отопительном устройстве, °C;

φ_o – относительный расход воды в отопительной сети;

Q_{op} – требуемая тепловая мощность системы отопления при данной наружной температуре.

Безразмерная удельная тепловая производительность теплообменников горячего водоснабжения:

$$\varepsilon(t_h) = \frac{1 - \exp\left[\frac{-kF}{W_m} \cdot \left(1 - \frac{W_m}{W_6}\right)\right]}{1 - \frac{W_m}{W_6} \cdot \exp\left[\frac{-kF}{W_m} \cdot \left(1 - \frac{W_m}{W_6}\right)\right]} \leq 1, \quad (2)$$

где kF – произведение коэффициента теплопередачи на площадь теплообменника, Вт/°C;

W_m, W_6 – меньший и больший эквиваленты расходов теплоносителей в теплообменнике.

Эквивалент расхода сетевой воды в теплообменниках определялся по формуле:

$$W(t_h) = \frac{Q_h}{\varepsilon \nabla}, \quad (3)$$

где Q_h – текущая тепловая мощность теплообменника;

∇ – максимальная разность температур теплоносителей на входе в теплообменник.

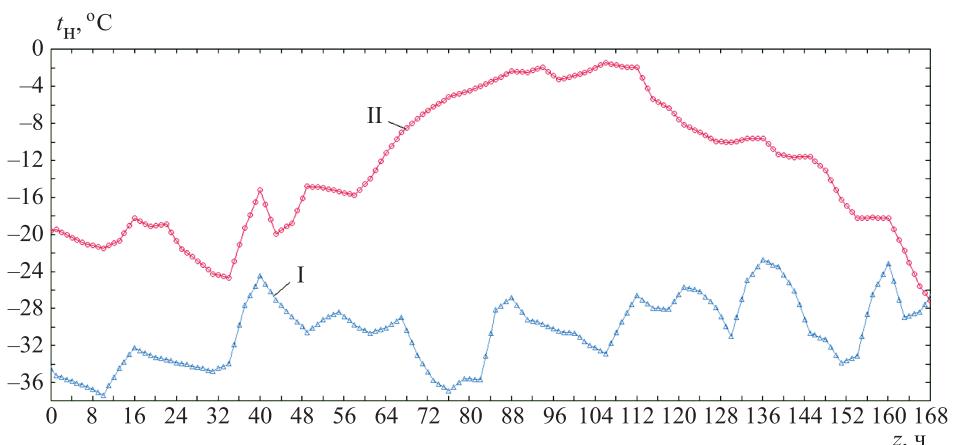


Рис. 2. Температура наружного воздуха в январе 2018 г. по данным [20]

I – период резкого похолода 21–27 января 2018 г.; II – период резкого потепления 7–13 января 2018 г.

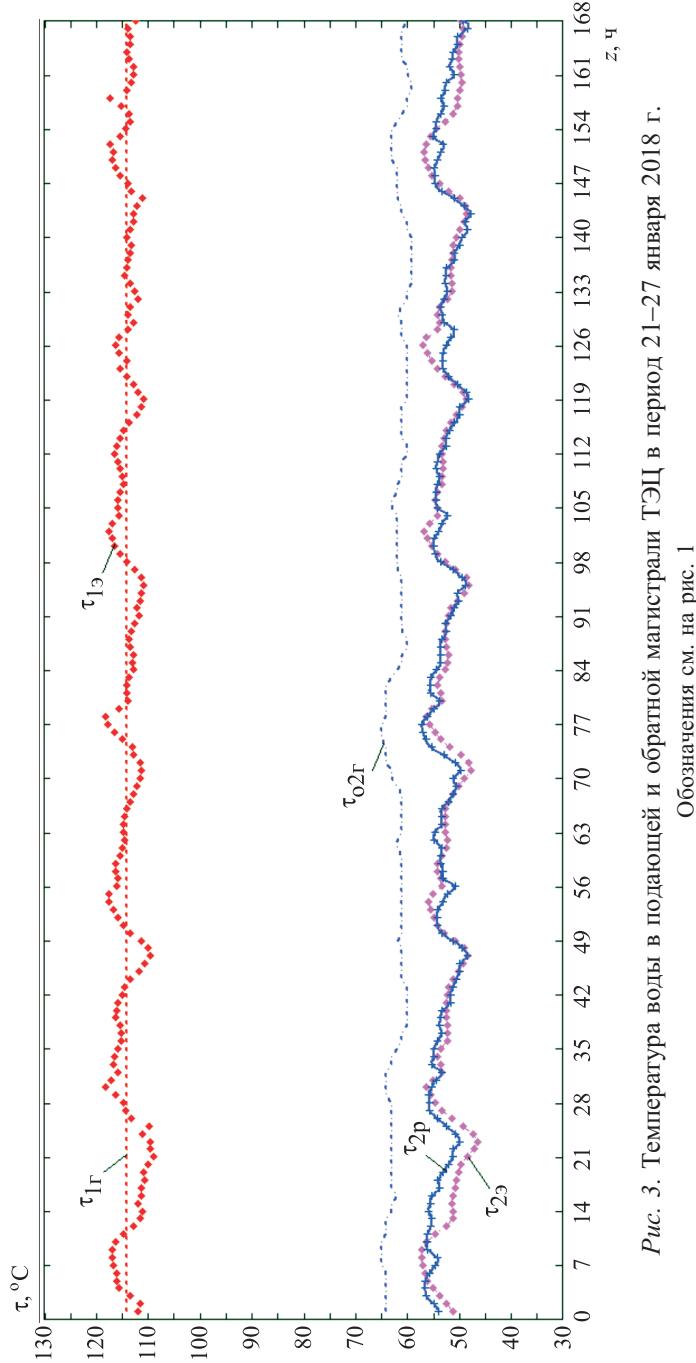


Рис. 3. Температура воды в подающей и обратной магистрали ТЭЦ в период 21–27 января 2018 г.

Обозначения см. на рис. 1

Рассматривались два интервала времени (резкое похолодание и резкое потепление, рис. 2), продолжительностью в одну неделю (168 ч) в течение января 2018 г. Для построения модели прогнозирования режимов работы теплосети использовались эксплуатационные данные о работе системы теплоснабжения Калининского вывода ТЭЦ-4 г. Новосибирска, с тепловой нагрузкой на отопление $Q_{\text{omax}} = 93,3707$ МВт; на вентиляцию $Q_{\text{vmax}} = 10,0242$ МВт; на горячее водоснабжение $Q_h = 65,9667$ МВт.

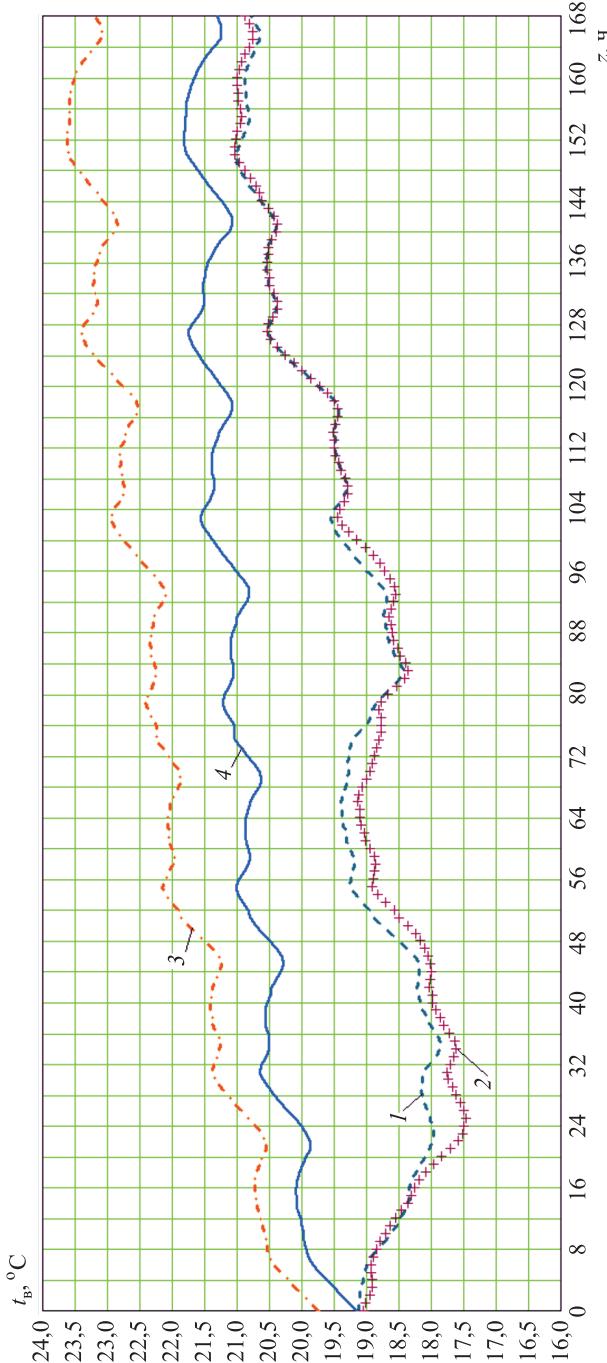


Рис. 4. Температура внутреннего воздуха 21–27 января 2018 г.
Цифры – номера вариантов

Режим работы ТЭЦ в период резкого похолодания (рис. 2, период I) и расчетные (прогнозируемые) значения температуры обратной воды показаны на рис. 3.

Расчет температурного режима помещений проводился для ЦПИ-кл20/32 в Калининском районе с таким же соотношением тепловых нагрузок, что и в районе в целом. Расчетные тепловые нагрузки: на отопление и вентиляцию $Q_{ov,max} = 5,22 \text{ МВт}$; на горячее водоснабжение $Q_h = 3,30 \text{ МВт}$. Температурный режим

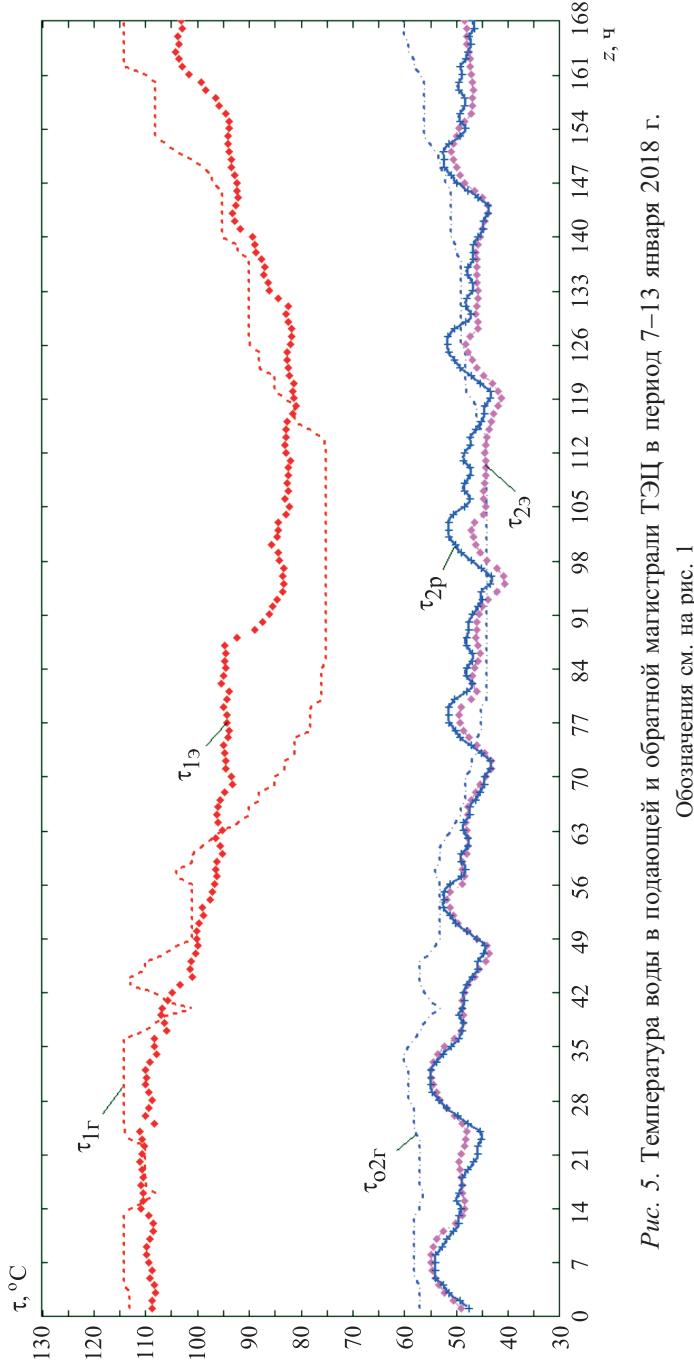


Рис. 5. Температура воды в подающей и обратной магистрали ТЭЦ в период 7–13 января 2018 г.
Обозначения см. на рис. 1

помещений рассчитывался с учетом коэффициента тепловой аккумуляции зданий $\beta = 87,8$ ч (здания с кирпичными стенами, утеплитель – плиты минераловатные) [20]. Текущая температура внутреннего воздуха $t_b^{\text{д}}$ за время z , ч, определялась по формуле:

$$t_b^{\text{д}} = t_h + \left[\frac{Q_o}{Q_{op}} + \left(\frac{t_b - t_h}{t_b^{\text{tp}} - t_{ho}} \right) \cdot e^{-\frac{z}{\beta}} \right] \cdot (t_b^{\text{tp}} - t_{ho}). \quad (4)$$

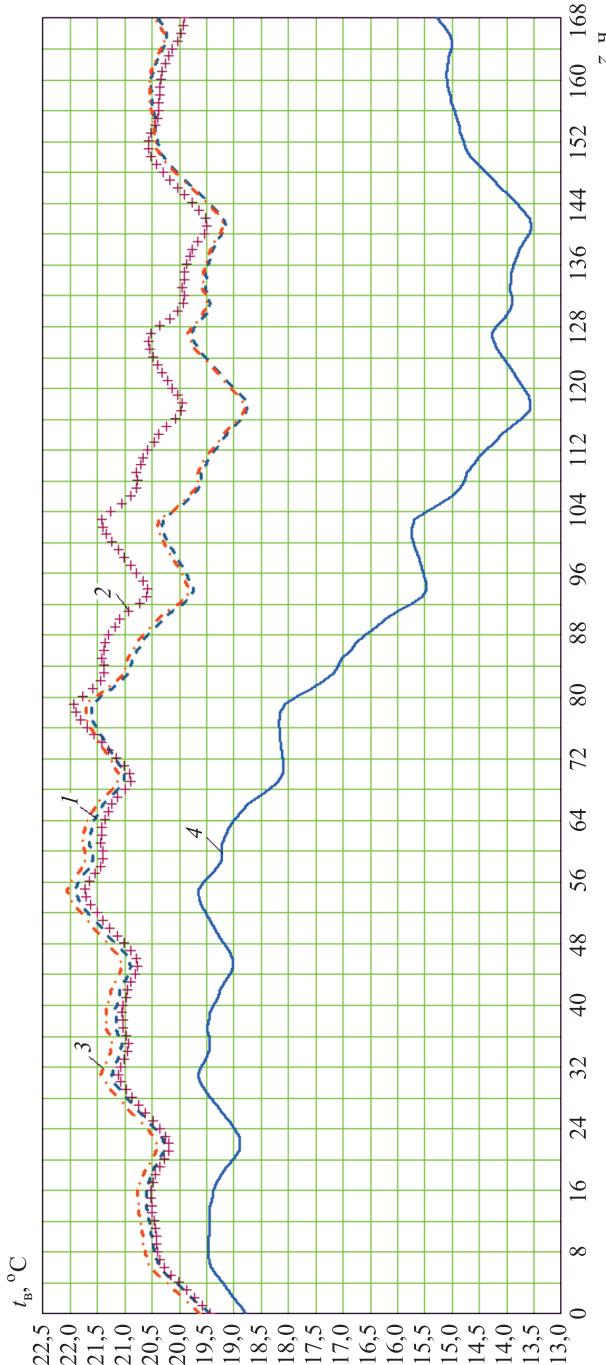


Рис. 6. Температура внутреннего воздуха 7–13 января 2018 г.

Цифры – номера вариантов

Расчеты проводились для четырех вариантов:

- 1 – по графику с расчетной температурой в подающей магистрали τ_{1r} ;
- 2 – по графику с эксплуатационной температурой в подающей магистрали τ_{1e} (см. рис. 3);
- 3 – по графику 150/70 °C с верхней срезкой на 130 °C;
- 4 – по графику 130/70 °C без верхней срезки.

Результаты расчета для I диапазона наружных температур показаны на рис. 4.

Согласно полученным данным, поднятие верхней срезки до 130 °C и применение графика 130/70 °C без верхней срезки позволит улучшить температурный режим помещений при низких наружных температурах. В то же время график 130/70 °C без верхней срезки обеспечит более низкую температуру внутреннего воздуха при большем расходе сетевой воды, чем график с верхней срезкой на 130 °C.

Далее был рассмотрен период резкого потепления с переходом через точку излома температурного графика (см. рис. 2, период II), которая для графика без верхней срезки соответствует более низкой наружной температуре, чем для графиков 150/70 °C со срезками 114 и 130 °C.

Температурный режим теплосети дан на рис. 5. Результаты расчета температуры внутреннего воздуха показаны на рис. 6.

Расчет показал недопустимое снижение внутренней температуры помещений (до 13,5 °C) для графика 130/70 °C без верхней срезки. Температура внутреннего воздуха, определенная по эксплуатационной температуре в по-дающей магистрали теплосети τ_{1_3} (вариант 2) немного выше температуры, полученной по расчетным значениям температурного графика (вариант 1), так как в теплосети поддерживалась температура выше требуемой по графику регулирования. В случае варианта 4, если источник теплоты будет поддерживать более высокую температуру в теплосети, чем требуется по графику, также возможно повысить температуру внутреннего воздуха, но при этом теляются преимущества качественного регулирования.

Выводы. 1. Переход на температурный график 130/70 °C без верхней срезки может привести к следующим неблагоприятным последствиям:

- увеличиваются расходы сетевой воды, что может потребовать увеличения диаметров трубопроводов (или замены сетевых насосов на источнике на более высоконапорные), а также корректировки гидравлических режимов теплосети;
- точка излома температурного графика сдвигается в область более низких температур наружного воздуха, а поскольку именно в точке излома система отопления работает в наиболее неблагоприятном режиме, это может вызвать существенное снижение температуры внутреннего воздуха отапливаемых зданий ниже 14 °C;
- может потребоваться реконструкция тепловых пунктов.

2. Более рациональным будет переход на температурный график 150/70 °C с верхней срезкой на 130 °C. В этом случае не потребуется какой-либо реконструкции трубопроводов и оборудования теплосети. В то же время температурный режим в отапливаемых помещениях будет более благоприятным, чем при срезке на 114 °C или при графике 130/70 °C без срезки. Область качественного регулирования также увеличится как за счет поднятия верхней срезки, так и за счет сокращения периода нижней срезки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шарапов В.И., Ротов П.В. Регулирование нагрузки систем теплоснабжения. М.: Изд-во «Новости теплоснабжения», 2007. 174 с.

2. Куликов А.И. Проблемы эксплуатации зданий при систематических нарушениях теплоснабжения (недотопах) // Материалы Второй рос. науч.-техн. конф. «Энергосбережение в городском хозяйстве». Ульяновск: УлГТУ, 2000. С. 49–51.
3. Шарапов В.И. Истинные и ложные пути энергосбережения // Жил. и коммун. хоз-во. 1999. № 11–12. С. 20–23.
4. Шарапов В.И. Особенности теплоснабжения городов при дефиците топлива на электростанциях // Электр. станции. 1999. № 10. С. 63–66.
5. 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.
6. Рафальская Т.А. Исследование нарушений режимов работы тепловых сетей крупных систем теплоснабжения // Теплоэнергетика. 2017. № 4. С. 85–90.
7. Гавей О.Ф., Панферов В.И. Оптимальная температура теплоносителя в системах ЦТС // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2014. № 1(145). С. 68–71.
8. Панферов В.И., Гавей О.Ф., Голяк С.А., Ульянин А.М. Возможности применения низкотемпературных систем теплоснабжения // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2014. № 3(123). С. 34–35.
9. Панферов В.И., Гавей О.Ф. Об оптимальной температуре теплоносителя в теплотранспортных системах // Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Серия: Стр-во и архитектура. 2013. Т. 13. № 1. С. 63–66.
10. Панферов В.И., Гавей О.Ф., Голяк С.А., Ульянин А.М. Оценка возможности применения низкотемпературных систем теплоснабжения в России // Вестн. МГСУ. 2011. № 7. С. 440–443.
11. Rimmer P. A remarkable district heating system // News of DHDB. 2003. No. 2. P. 51–55.
12. Gullev L. Introduction of incentive traffics – a benefit for the environment // News of DHDB. 2005. No. 1. P. 12–14.
13. Bjork H., Steen E. From Greenfield to a new district heating system // News of DHDB. 2005. No. 1. P. 18–21.
14. Ulbjerg F. Low temperature heat sources // News of DHDB. 2003. No. 2. P. 42–45.
15. Detroja K.P., Gudi R.D., Patwardhan S.C. Plant-wide detection and diagnosis using correspondence analysis // Control Engineering Practice. 2007. Vol. 15. Iss. 12. P. 1468–1483.
16. Седнин А.В., Марченко П.Ю. К выбору метода регулирования отпуска теплоты от ТЭЦ // Изв. высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2008. № 1. С. 48–54.
17. Ротов П.В. Особенности работы городской системы теплоснабжения в переходный период // Новости теплоснабжения. 2009. № 10. С. 37–42.
18. Ротов П.В., Шарапов В.И. Особенности регулирования нагрузки систем теплоснабжения в переходный период // Энергосбережение и водоподготовка. 2010. № 2(64). С. 25–28.
19. Рафальская Т.А., Мансуров Р.Ш. Оценка влияния температуры воды в системе горячего водоснабжения на температурный режим помещений // Водоснабжение и сан. техника. 2017. № 4. С. 42–49.
20. Рафальская Т.А., Мансуров Р.Ш., Рагинская А.О., Расенко Д.А. Теплоустойчивость наружных ограждений и тепловой режим помещений в периоды срезок температурного графика // Изв. вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2017. Т. 7. № 4. С. 192–203.

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

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
Рохлецова Татьяна Лаврентьевна, канд. техн. наук, доц.;
E-mail: rokhlecovat@yandex.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
Тюсов Сергей Михайлович, студ.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 16.04.18

Rafalskaya Tatyana Anatolevna, PhD, Ass. Professor;

E-mail: rafalskaya.ta@yandex.ru

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

Rokhletsova Tatyana Lavrentevna, PhD, Ass. Professor;

E-mail: rokhlecovat@yandex.ru

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

Tyusov Sergey Mikhaylovich, Student

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

CENTRAL REGULATION WITHOUT UPPER CUT:

CAPABILITIES AND PROSPECTS

The problems of ensuring high-quality regulation of heat supply systems and the possibility of transition to graphs with a lower design temperature without top cut are considered. In the low-temperature range of outdoor air, both graphics provide an acceptable indoor air temperature in residential buildings. When transition to a graph with a lower design temperature without an upper cut, the area of qualitative regulation of the heat load shifts to the area of lower external temperatures of the outside air and becomes longer in duration in comparison with the use of a graph with a higher calculated temperature, but with a top-cut. However, at low temperatures, the load of the second stage of the hot water heat exchanger is low, which makes it possible to provide an acceptable internal temperature in the top-cut graph, with a lower consumption of network water. The most unfavorable internal temperature regime is observed within the breaking point of the temperature graph, when the maximum load of the second stage of the hot water heater is. Moreover, in the graph without upper cut, the break point is in the region of lower outside air temperatures, when the heat loss is still high enough, and even the permissible values of the internal temperature in residential buildings cannot be provided.

К e y w o r d s: heat supply system, heat network, upper cut of temperature graph, room temperature conditions, central quality regulation.

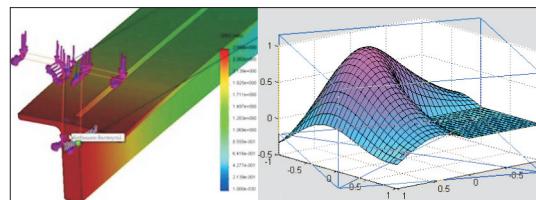
REFERENCES

1. Sharapov V.I., Rotov P.V. Regulirovanie nagruzki sistem teplosnabzheniya [Regulation of the load of heat supply systems]. Moscow, Publishing house «Heat supply news», 2007. 174 p. (in Russian)
2. Kulikov A.I. Problemy ekspluatatsii zdaniy pri sistematiceskikh narusheniyakh teplosnabzheniya (nedotopakh) [The problems of building management in the case of systematic violations of heat supply]. Materialy Vtoroy rossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Energosberezhenie v gorodskom khozyaystve» [Materials of the Second Russian Scientific and Technical Conference «Energy Saving in Urban Management»]. Ulyanovsk, UlSTU, 2000. Pp. 49–51. (in Russian)
3. Sharapov V.I. Istinnye i lozhnye puti energosberezheniya [True and false ways of saving energy]. Zhilishchnoe i kommunal'noe khozyaystvo [Housing and communal services]. 1999. No. 11-12. Pp. 20–23. (in Russian)

4. Sharapov V.I. Osobennosti teplosnabzheniya gorodov pri defitsite topliva na elektrostantsiyakh [Features of city heat supply in case of fuel shortage in power plants]. Elektricheskie stantsii [Electric stations]. 1999. No. 10. Pp. 63–66. (in Russian)
5. Rafaelskaya T.A., Mansurov R.Sh., Efimov D.I., Kosova 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)
6. Rafaelskaya T.A. Issledovanie narusheniy rezhimov raboty teplovyykh setey krupnykh system teplosnabzheniya [Investigation of Failures in Operation of Heat Networks of Large Heat Supply Systems]. Teploenergetika [Thermal Engineering]. 2017. Vol. 64. No. 4. Pp. 313–317.
7. Gavey O.F., Panferov V.I. Optimal'naya temperatura teplonositelya v sistemakh TsTS [The optimum temperature of the heat carrier in district heating systems]. Santechnika, otoplenie, konditsionirovanie [Plumbing, heating, air conditioning]. 2014. No. 1(145). Pp. 68–71. (in Russian)
8. Panferov V.I., Gavey O.F., Gol'yak S.A., Ulyanov A.M. Vozmozhnosti primeneniya nizkotemperaturnykh sistem teplosnabzheniya [The possibilities of using low-temperature heat supply systems]. Santechnika, otoplenie, konditsionirovanie [Plumbing, heating, air conditioning]. 2014. No. 3(123). Pp. 34–35. (in Russian)
9. Panferov V.I., Gavey O.F. Ob optimal'noy temperatury teplonositelya v teplotransportnykh sistemakh [On optimal heat transfer agent temperature in heat transportation systems]. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seria Stroitel'stvo i arkhitektura [Bulletin of the South Ural State University. Series Construction Engineering and Architecture]. 2013. Vol. 13. No. 1. Pp. 63–66. (in Russian)
10. Panferov V.I., Gavey O.F., Gol'yak S.A., Ulyanov A.M. Otsenka vozmozhnosti primeneniya nizkotemperaturnykh sistem teplosnabzheniya v Rossii [Assessment of the feasibility of using low-temperature heat supply systems in Russia]. Vestnik MGSU [Bulletein of MSUCE]. 2011. No. 7. Pp. 440–443. (in Russian)
11. Rimmer P. A remarkable district heating system. News of DHDB. 2003. No. 2. Pp. 51–55.
12. Gullev L. Introduction of incentive traffics – a benefit for the environment. News of DHDB. 2005. No. 1. Pp. 12–14.
13. Bjork H., Steen E. From Greenfield to a new district heating system. News of DHDB. 2005. No. 1. Pp. 18–21.
14. Ulbjerg F. Low temperature heat sources. News of DHDB. 2003. No. 2. Pp. 42–45.
15. Detroja K.P., Gudi R.D., Patwardhan S.C. Plant-wide detection and diagnosis using correspondence analysis. Control Engineering Practice. 2007. Vol. 15. Iss. 12. Pp. 1468–1483.
16. Sednin A.V., Marchenko P.Yu. K vyboru metoda regulirovaniya otpuska teploty ot TETs [To the choice of the method for regulating the heat supply from the CHPP]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'edineniy SNG. Energetika [News of higher educational institutions and energy associations of the CIS. Power Engineering]. 2008. No. 1. Pp. 48–54. (in Russian)
17. Rotov P.V. Osobennosti raboty gorodskoy sistemy teplosnabzheniya v perekhodnyy period [Features of the operation of the city heat supply system during the transition period]. Novosti teplosnabzheniya [Heat supply news]. 2009. No. 10. Pp. 37–42. (in Russian)
18. Rotov P.V., Sharapov V.I. Osobennosti regulirovaniya nagruzki sistem teplosnabzheniya v perekhodnyy period [Features of heat load regulation in the transition period]. Energosberezenie i vodopodgotovka [Energy saving and water treatment]. 2010. No. 2(64). Pp. 25–28. (in Russian)

19. Rafalskaya T.A., Mansurov R.Sh. Otsenka vliyaniya temperatury vody v sisteme goryachego vodosnabzheniya na temperaturnyy rezhim pomeshcheniy [Evaluation of the water temperature in the hot water system effect on the indoor temperature conditions]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary engineering]. 2017. No. 4. Pp. 42–49. (in Russian)
20. Rafalskaya T.A., Mansurov R.Sh., Raginskaya A.O., Rasenko D.A. Teploustoychivost' naruzhnykh ograzhdeniy i teplovoy rezhim pomeshcheniy v periody srezok temperaturnogo grafika [Thermal resistance of outer fences and thermal conditions of premises in the period of cropping in temperature chart]. Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' [Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real Estate]. 2017. Vol. 7. No. 4. Pp. 192–203. (in Russian)

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



УДК 69.05 : 658.5.012.2 : 519.876.5

В.С. ВОРОБЬЕВ, А.С. СИНИЦЫНА, К.В. КАТАЛЫМОВА,
Н.П. ЗАПАЩИКОВА

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СТРУКТУРЕ СОЗДАНИЯ БИМ-ТЕХНОЛОГИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ

Предлагается имитационная модель создания современных БИМ-технологий в строительном комплексе, ориентированных на реализацию виртуальных технологий, методов организации строительства и обработки больших массивов данных в реальном времени, по своей сути отражающих экспертные системы. Модель отражает структуру строительного производства и его ресурсного обеспечения, она представлена совокупностью модулей формирования очередности строительства объектов, проверки директивных (плановых) сроков строительства, формирования фронта работ и проверки параметров опережения назначения исполнителей и строительной техники, поставок материальных ресурсов, объединенных условиями постановки задач, имитации строительного процесса и расчета технико-экономических показателей, параметров строительного производства. Предложен и обоснован математический аппарат описания потенциально возможных производственных ситуаций при вариациях исполнителей, строительной техники, объемов СМР, сезонности их выполнения. Использование данной модели в рамках развития цифровой экономики позволит перейти к управлению проектами в условиях виртуальной реальности.

Ключевые слова: модель, строительное производство, выполнение работ, производительность, вероятность.

В современных системах управления возведения объектов недвижимости используются различные аппаратно-программные комплексы, реализующие современные системы планирования и управления и базирующиеся на системах управления базами данных (СУБД). В настоящее время активно развивается БИМ-технология в рамках реализации цифровой экономики [1, 2].

Рациональное сочетание лучших технологических решений строительства и реконструкции объектов недвижимости, основанных на современных информационных и геоинформационных процессах, является актуальной задачей, позволяющей существенно повысить эффективность строительной отрасли и содержание объектов ЖКХ [3–5]. При этом актуальным является обеспечение приемлемого уровня организационно-технологической и технической надежности.

© Воробьев В.С., Синицына А.С., Каталымова К.В., Запащикова Н.П.,
2018

Эффективным инструментом решения проблем обеспечения строительства, содержания, реконструкции и капитального ремонта объектов ЖКХ являются полнофункциональные системы управления, позволяющие получить следующие эффекты: экономические, организационные, технологические, инвестиционные (сокращение сроков работ при строительстве и ремонте объектов недвижимости на 15–30 %, снижение затрат на реконструкцию до 30 %).

Авторами предлагается метод имитационного моделирования строительных процессов, составляющий суть современного подхода к проектированию БИМ-технологий.

Он основан на следующих допущениях: учете известных на практике и описанных в теории графиков планирования работ – линейных, сетевых, обобщенно-сетевых.

Каждая работа характеризуется объемами, временем выполнения и исполнителями. Объем i -й строительно-монтажной работы на сосредоточенных объектах, выполненной j -м подразделением (исполнителем) к текущему моменту времени t , можно определить по следующей формуле:

$$Q_{ij}(t) = a_{ij}(1-\eta_i) \int_{t_{ij}^i}^t \Pi_{ij}(t) W_{ij}(t) dt, \quad i = \overline{1, N}; \quad j = \overline{1, M},$$

где N – количество СМР;

M – количество исполнителей.

Объем r -й работы, выполненной v -м исполнителем к тому же моменту времени:

$$Q_{rv}(t) = a_{rv}(1-\eta_i) \int_{t_{ij}^i}^t \Pi_{rv}(t) W_{rv}(t) dt,$$

где $P_{ij}(t)$ – производительность труда j -го исполнителя на i -й работе в момент времени t , $0 \leq t < \infty$;

$W_{rv}(t)$ – численность j -го исполнителя на i -й работе;

n – число строительно-монтажных работ;

m – количество исполнителей;

$$W_{rv}(t) = W_{rv}(t_{rv}^i), \quad \text{где } t_{rv}^i \leq t \leq t_{rv}^k.$$

Целью моделирования является определение t_{rv}^i , при котором r -я работа опережает i -ю на величину параметра в процессе ее выполнения от начала до окончания.

Моделирование СМР во времени выполняется с шагом Δt .

В этом случае опережения r -й работы относительно i -й по объему можно записать:

$$\Delta Q_{ij}(t) = Q_{ij}(t) - \alpha Q_{rv}(t) \begin{cases} \geq \\ = \\ \leq \end{cases} \psi_{ir}^Q. \quad (1)$$

Из рис. 1, а видно, что ограничение типа (\geq) будет выполняться, если $\Delta Q_{ir}(t) \geq \psi_{ir}^Q$ на промежутке времени (t', t'') .

Здесь $t' = \min_t \{t_{ij}^i, t_{rv}^i\}$, $t'' = \min_t \{t_{ij}^k, t_{rv}^k\}$.

Ограничение (\leq) будет выполнено при $\Delta Q_{ir}(t) \leq \psi_{ir}^Q$. Для этого t_{rv}^i необходимо сместить влево, т.е. эту работу начать раньше.

Для дальнейшего исследования $\Delta Q_{ir}(t)$ обозначим через $\theta(t^*) = \Delta Q_{ir}(t)$ для любой точки t^* , где $t^* \in (t', t'')$.

Докажем, что функция $\theta(t^*)$ для t^* в интервале $[t' - t'']$ моментально не убывает при смещении работы t_{rv}^i во времени.

Доказательство:

$$\begin{aligned} \theta(t^*) &= \Delta Q_{ir}(t) = a_{ij}(1-\eta_i) \times \\ &\times \int_{t_{ij}^i}^{t^*} \Pi_{ij}(t) W_{ij}(t) dt - a_{rv}(1-\eta_r) \int_{t_{rv}^i}^{t^*} \Pi_{rv}(t) W_{rv}(t) dt. \end{aligned} \quad (2)$$

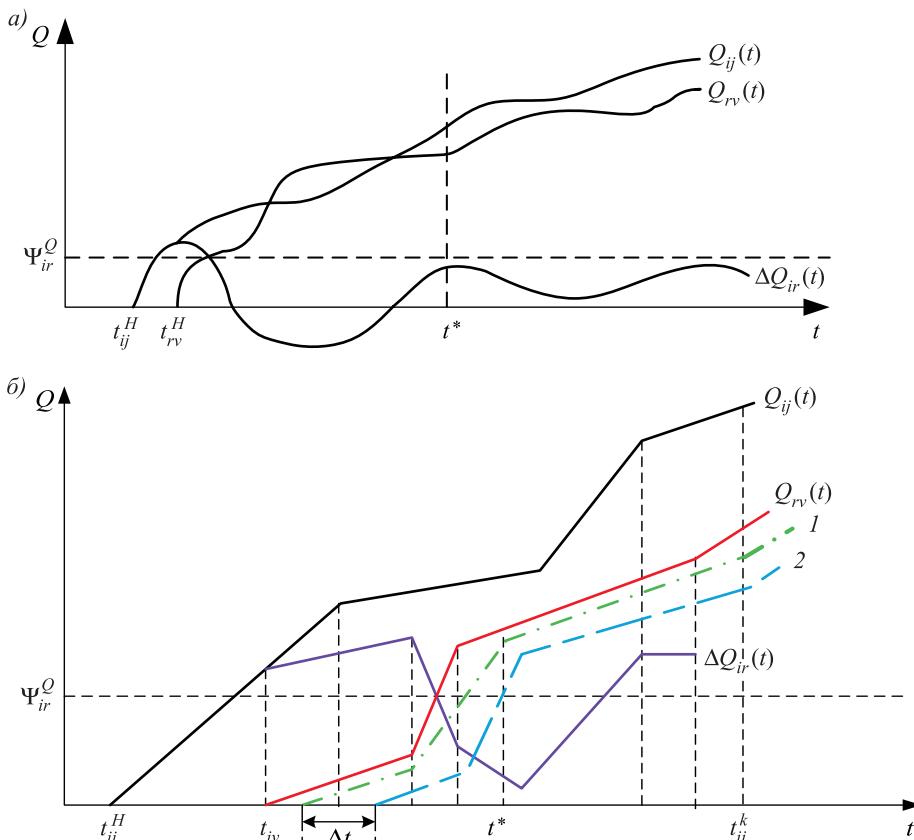


Рис. 1. Характер изменения объемов работ

α – при непрерывном изменении численности исполнителей $W(t)$; *β* – при кусочно-постоянном характере изменения числа исполнителей $W(t)$

Увеличим t_{rv}^i на Δt . Тогда

$$\begin{aligned}\theta(t^*) &= \Delta Q_{ir}(t) = \alpha_{ij}(1-\eta_i) \int_{t_{ij}^H}^{t^*} \Pi_{ij}(t) W_{ij}(t) dt - \alpha_{rv}(1-\eta_r) \times \\ &\quad \times \int_{t_{rv}^H + \Delta t}^{t^*} \Pi_{rv}(t) W_{rv}^*(t) dt.\end{aligned}\tag{3}$$

Здесь $W_{rv}^*(t)$ – функция $W_{rv}(t)$, сдвинутая по оси t вправо на Δt , т.е.

$$W_{rv}^*(t) = W_{rv}(t + \Delta t).$$

При уменьшении второго члена в формуле (3) $\theta(t^*)$ возрастает. Покажем, что при увеличении t_{rv}^i на Δt $\theta(t^*)$ действительно уменьшается.

1. Пусть $\Pi_{rv} = \max$, $\Pi_{rv}(t) = \text{const}$.

Тогда

$$\theta(t^*) = A_{ij} - a_{rv}(1-\eta_r) \Pi_{rv} \int_{t_{rv}^H}^{t^*} W_{rv}^*(t) dt,$$

$$\text{где } A_{ij} = a_{ij}(1-\eta_i) \int_{t_{rv}^H}^{t^*} \Pi_{ij} W_{ij}(t) dt.$$

Функция W_{rv}^* смещена вправо по оси t на Δt .

Тогда

$$\theta(t^*) = A_{ij} - a_{rv}(1-\eta_r) \Pi_{rv} \int_{t_{rv}^H}^{t^* + \Delta t} W_{rv}(t) dt.\tag{4}$$

Из сравнения вторых членов в формулах (2), (4) с учетом (3) следует, что

$$\begin{aligned}\alpha_{rv}(1-\eta_r) \Pi_{rv} \int_{t_{rv}^H}^{t^*} W_{rv}(t) dt &= \alpha_{rv}(1-\eta_r) \Pi_{rv} \times \\ &\quad \times \int_{t_{rv}^H}^{t^* + \Delta t} W_{rv}(t) dt + \alpha_{rv}(1-\eta_r) \Pi_{rv} \int_{t^* - \Delta t}^{t^*} W_{rv}(t) dt,\end{aligned}$$

т.е. $\theta(t^*)$ изменяется в сторону увеличения.

2. Пусть $W_{rv}(t) = \text{const}$.

Тогда

$$\theta(t^*) = \Delta Q_{ir}(t) = A_{ij} - a_{rv}(1-\eta_r) W_{rv} \int_{t_{rv}^H}^{t^*} \Pi_{rv}(t) dt.\tag{5}$$

В формуле (5) изменяется нижний предел интегрирования (возрастает). Следовательно, $\theta(t^*)$ увеличилось или не изменилось.

Из этого вытекает, что при постоянной производительности ($\Pi_{rv} = \text{const}$) и переменной численности исполнителя ($W_{rv} = W_{rv}(t)$) или переменной производительности ($\Pi_{rv} = \Pi_{rv}(t)$) и постоянной численности исполнителя ($W_{rv} = \text{const}$) начало r -й работы, перенесенное на более поздний срок соглас-

но параметра опережения, обеспечивает заданное опережение между работами $\{i, r\}$. При переменных производительности ($\Pi_{rv} = \Pi_{rv}(t)$) и численности исполнителей ($W_{rv} = W_{rv}(t)$) и t_{rv}^H , сохраняющим ограничение (1) на интервале времени выполнения работ $\{i, r\}$, возможен случай, когда сдвиг t_{rv}^H не нарушает условие в формуле (1).

В практике планирования СМР $W(t)$ и $\Pi(t)$ можно использовать кусочно-постоянную зависимость.

Тогда

$$W_{ij}(t) = \begin{cases} W_{ij}^{(1)} & \text{при } 0 < t \leq t_{ij}^{(1)}, \\ W_{ij}^{(2)} & \text{при } t_{ij}^{(1)} < t \leq t_{ij}^{(2)}, \\ W_{ij}^{(n)} & \text{при } t_{ij}^{(n-1)} < t \leq t_{ij}^{(n)}. \end{cases}$$

Пусть $\Pi_{ij} = \text{const}$.

Тогда

$$\begin{aligned} Q_{ij}(t) = & \alpha_{ij}(1 - \eta_i)\Pi_{ij} \int_{t_{ij}^H}^t [W_{ij}^{(1)}(0 \leq t < t_{ij}^{(1)}) + W_{ij}^{(2)}(t_{ij}^{(1)} \leq t < t_{ij}^{(2)}) + \dots + \\ & + W_{ij}^{(n)}(t_{ij}^{(n-1)} \leq t < t_{ij}^{(n)})] dt = \alpha_{ij}(1 - \eta_i)\Pi_{ij}[W_{ij}^{(1)}t_{ij}^{(1)} + W_{ij}^{(2)}(t_{ij}^{(2)} - t_{ij}^{(1)}) + \dots + \\ & + W_{ij}^{(\xi)}(t - (t_{ij}^{(\xi-1)} + t_{ij}^H))], \end{aligned}$$

т.е. r -ю работу может выполнять исполнитель, численность которого меняется:

$$W_{ij}(t) = \begin{cases} W_{rv}^{(1)} & \text{при } 0 < t \leq t_{rv}^{(1)}, \\ W_{rv}^{(2)} & \text{при } t_{rv}^{(1)} < t \leq t_{rv}^{(2)}, \\ W_{rv}^{(k)} & \text{при } t_{rv}^{(k-1)} < t \leq t_{rv}^{(k)}. \end{cases}$$

В этом случае $Q_{rv}(t) = \alpha_{rv}(1 - \eta_r)\Pi_{rv}[W_{rv}^{(1)}t_{rv}^{(1)} + W_{rv}^{(2)}(t_{rv}^{(2)} - t_{rv}^{(1)}) + K + W_{rv}^{(p)}(t - (t_{rv}^{(p-1)} + t_{rv}^H))]$.

$$\begin{aligned} Q_{ij}(t) - \alpha Q_{rv}(t) = & \alpha_{ij}(1 - \eta_i)\Pi_{ij}[W_{ij}^{(1)}t_{ij}^{(1)} + W_{ij}^{(2)}(t_{ij}^{(2)} - t_{ij}^{(1)}) + K + \\ & + W_{ij}^{(\xi)}(t - (t_{ij}^{(\xi-1)} + t_{ij}^H))] - \alpha a_{rv}(1 - \eta_r)\Pi_{rv}[W_{rv}^{(1)}t_{rv}^{(1)} + W_{rv}^{(2)}(t_{rv}^{(2)} - t_{rv}^{(1)}) + K + \\ & + W_{rv}^{(p)}(t - (t_{rv}^{(p-1)} + t_{rv}^H))]. \end{aligned}$$

Обозначим через $\tau^{(s)} = t^{(s)} - t^{(s-1)}$, $A_{ij} = a_{ij}(1 - \eta_i)\Pi_{rv}$, $A_{rv} = a_{rv}(1 - \eta_r)\Pi_{rv}$,

$$\begin{aligned} Q_{ir}(t) = & A_{ij}[W_{ij}^{(1)}\tau_{ij}^{(1)} + W_{ij}^{(2)}\tau_{ij}^{(2)} + W_{ij}^{(\xi)}(t - (t_{ij}^{(\xi-1)} + t_{ij}^H))] - \\ & - \alpha A_{rv}[W_{rv}^{(1)}\tau_{rv}^{(1)} + W_{rv}^{(2)}\tau_{rv}^{(2)} + W_{rv}^{(p)}(t - (t_{rv}^{(p-1)} + t_{rv}^i))], \\ \Delta Q_{ir}(t) = & A_{ij}[W_{ij}^{(1)}\tau_{ij}^{(1)} + W_{ij}^{(2)}\tau_{ij}^{(2)} + K + W_{ij}^{(\xi)}(t - (t_{ij}^{(\xi-1)} + t_{ij}^H))] - \\ & - \alpha A_{rv}[W_{rv}^{(1)}\tau_{rv}^{(1)} + W_{rv}^{(2)}\tau_{rv}^{(2)} + K + W_{rv}^{(p)}(t - (t_{rv}^{(p-1)} + t_{rv}^i))] = \end{aligned} \quad (6)$$

$$= A_{ij} [\sum W_{ij}^{(s)} \tau_{ij}^{(s)} + W_{ij}^{(s)} (t - (t_{ij}^{(\xi-1)} + t_{ij}^H))] - \\ - \alpha A_{rv} \left[\sum_{s=1}^{s=p-1} W_{rv}^{(s)} \tau_{rv}^{(s)} + W_{rv}^{(p)} (t - t_{rv}^{(p-1)} + t_{rv}^i) \right] \begin{cases} \geq \\ = \\ \leq \end{cases} \psi_{ir}^Q.$$

На рис. 1, б обозначены функции $Q_{ij}(t)$, $Q_{rv}(t)$ и $Q_{ir}(t)$. Выполнение неравенства (\geq) в (6) возможно, когда r -я работа начинается при $\min_{t' \leq t \leq t^i} \Delta Q_{ir}(t) \geq \psi_{ir}^Q$,

где $t' = \min_t \{t_{ij}^H, t_{rv}^H\}$, $t'' = \min_t \{t_{ij}^k, t_{rv}^k\}$.

Неравенство (\leq) в (6) возможно, когда r -я работа начинается в момент времени, обеспечивающий неравенство $\min_{t' \leq t \leq t^i} \Delta Q_{ir}(t) \leq \psi_{ir}^Q$.

Покажем, что при изменении срока начала r -й работы относительно i -й и неизменных длительностях интервалов изменения численности исполнителей любое значение функции $\Delta Q_{ir}(t)$ монотонно не убывает в интервале (t', t'') [5].

$Q_{ij}(t)$ и $Q_{rv}(t)$ – кусочно-непрерывные неубывающие функции. Найдем $\Delta Q_{ir}(t)$ при увеличении t_{rv}^i на Δt .

Обозначим

$$B = A_{ij} \left[\sum_{s=1}^{s=\xi-1} W_{ij}^{(s)} \tau_{ij}^{(s)} + W_{ij}^{(\xi)} (t - (t_{ij}^{(\xi-1)} + t_{ij}^H)) \right].$$

Рассмотрим следующие варианты:

Вариант I.

$$\Delta Q_{ir}(t) = B - \alpha A_{rv} \left[\sum_{s=1}^{s=p-1} W_{rv}^{(s)} \tau_{rv}^{(s)} + W_{rv}^{(p)} (t - (t_{rv}^{(p-1)} + t_{rv}^H + \Delta t)) \right], \quad (7)$$

т.е. момент времени t лежит в интервале $\{t^{(p-1)}, t^{(p)}\}$. При сдвиге функции $Q_{rv}(t)$ интервал не изменился.

Вариант II.

$$\Delta Q_{ir}(t) = B - \alpha A_{rv} \left[\sum_{s=1}^{s=p-2} W_{rv}^{(s)} \tau_{rv}^{(s)} + W_{rv}^{(p-1)} (t - (t_{rv}^{(p-2)} + t_{rv}^H + \Delta t)) \right], \quad (8)$$

т.е. момент времени t попадает в интервал $\{t^{(p-2)}, t^{(p-1)}\}$.

Случай 1. В формуле (7) B остается постоянной величиной. Временной интервал $(t - t_{rv}^{(p-1)} + t_{rv}^H + \Delta t)$ уменьшился на Δt . Численность исполнителей $W_{rv}^p \times (t - t_{rv}^{(p-1)} + t_{rv}^H + \Delta t)$ уменьшилась, и в целом член $\alpha A_{rv} \left[\sum_{s=1}^{s=p-1} W_{rv}^{(s)} \tau_{rv}^{(s)} + W_{rv}^{(p)} (t - (t_{rv}^{(p-1)} + t_{rv}^H + \Delta t)) \right]$ уменьшился. Следовательно, $\Delta Q_{ir}(t)$ возросло. При попадании t с границей интервалов рассматривается случай 2.

Случай 2. В формуле (8) выражение в квадратных скобках уменьшилось на величину $W_{rv}^{(p)}\Delta t' + W_{rv}^{(p-1)}\Delta t''$, где $\Delta t' + \Delta t'' = \Delta t$.

Следовательно, $\Delta Q_{ir}(t)$ возросло.

При $W_{rv}^{(p)} = 0$ или $W_{rv}^{(p-1)} = 0$

$$\Delta Q_{ir}(t) = B - \alpha A_{rv} \sum_{s=1}^{s=p-1} W_{rv}^{(s)} \tau_{rv}^{(s)}$$

для первого случая $\Delta Q_{ir}(t) = B - \alpha A_{rv} \sum_{s=1}^{s=p-2} W_{rv}^{(s)} \tau_{rv}^{(s)}$ и для второго случая не

изменились.

Изложенные выше выкладки справедливы для любого $t \rightarrow \min\{t_{ij}^k, t_{rv}^k\}$, так как момент времени t выбран произвольно. Пусть численность исполнителей постоянна при выполнении всего объема $W_{ij} = \text{const } \forall i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}$.

Величина производительности труда может меняться по временным интервалам (сезонам):

$$\Pi_{ij}(t) = \begin{cases} \Pi_{ij}^{(1)} & \text{при } t_0 \leq t < t_1, \\ \Pi_{ij}^{(2)} & \text{при } t_1 \leq t < t_2, \\ \dots & \dots \\ \Pi_{ij}^{(m)} & \text{при } t_{m-1} \leq t < t_m. \end{cases}$$

Объем работы, выполненный с момента ее начала до произвольного времени t , равен

$$\begin{aligned} Q_{ij}(t) &= a_{ij}(1-\eta_i)W_{ij} \int_{t_{ij}^H}^t [\Pi_{ij}^h(t_{ij}^H \leq t < t_h) + K + \\ &\quad + \Pi_{ij}^{h+1}(t_h \leq t < t_{h+1}) + K + \Pi_{ij}^\xi(t_{\xi-1} \leq t < t_\xi)] dt = \\ &= a_{ij}(1-\eta_i)W_{ij} [\Pi_{ij}^h(t_h - t_{ij}^H) + \Pi_{ij}^{h+1}(t_{h+1} - t_h) + K + \Pi_{ji}^\xi(t - t_{\xi-1})], \end{aligned}$$

где h – временной интервал (номер сезона), в котором начинается i -я работа.

$$\begin{aligned} Q_{rv}(t) &= a_{rv}(1-\eta_r)W_{rv} [\Pi_{rv}^\phi(t_\phi - t_{rv}^H) + \Pi_{rv}^{\phi+1}(t_{\phi+1} - t_\phi) + K + \Pi_{rv}^\beta(t - t_{\beta-1})], \\ \Delta Q_{ir}(t) &= a_{ij}(1-\eta_i)W_{ij} [\Pi_{ij}^h(t_h - t_{ij}^H) + \Pi_{ij}^{h+1}(t_{h+1} - t_h) + \Pi_{ij}^\xi(t - t_{\xi-1})] - \\ &\quad - a_{rv}(1-\eta_r)W_{rv} [\Pi_{rv}^\phi(t_\phi - t_{rv}^H) + \Pi_{rv}^{\phi+1}(t_{\phi+1} - t_\phi) + K + \Pi_{rv}^\beta(t - t_{\beta-1})] \begin{cases} \geq \\ \leq \end{cases} \Psi_{ir}^Q. \end{aligned}$$

Характер выполнения объемов работ по времени представлен на рис. 2. Покажем, что любое значение функции $\theta(t^*) = \Delta Q_{ir} \left(\frac{t}{t} = t^* \right)$ монотонно не убывает, t^* меняется в интервале (t', t'') при изменении t_{rv}^i (сдвиг вправо).

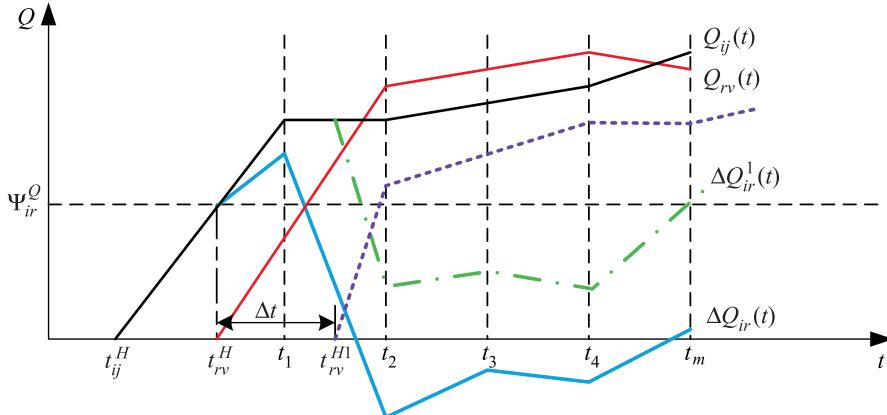


Рис. 2. Зависимость объемов выполняемой работы от времени при сезонном изменении производительности труда ($W = \text{const}$ и $\Pi = \Pi(t)$)

Обозначим выражение в первых квадратных скобках через D и в дальнейшем его раскрывать не будем, так как оно постоянно

$$D = a_{ij}(1-\eta_i)W_{ij}[\Pi_{ij}^h(t_h - t_{ij}^H) + \Pi_{ij}^{h+1}(t_{h+1} - t_h) + K + \Pi_{ij}^\xi(t - t_{\xi-1})].$$

$$C_{rv} = a_{rv}(1-\eta_r)W_{rv}.$$

Следующий шаг заключается в определении $\Delta Q_{ir}(t)$ при сдвиге t_{rv}^H на Δt . При этом рассмотрим два случая:

1) момент времени $(t_{rv}^H + \Delta t)$ остается в том же сезоне;

2) момент времени $(t_{rv}^H + \Delta t)$ перемещается в следующий сезонный интервал.

Совпадение $(t_{rv}^H + \Delta t)$ с границей сезонов относится ко 2-му случаю.

Случай 1.

$$\Delta Q'_{ir}(t^*) = D - C_{rv}[\Pi_{rv}^\phi(t_\phi - t_{rv}^H - \Delta t) + \Pi_{rv}^{\phi+1}(t_{\phi+1} - t_\phi) + K + \Pi_{rv}^\beta(t^* - t_{\beta-1})].$$

Анализ выражения, заключенного в квадратных скобках, показывает его уменьшение. Следовательно, $\Delta Q'_{ir}(t)$ возрастает.

Случай 2.

$$\Delta Q'_{ir}(t^*) = D - C_{rv}[\Pi_{rv}^{\phi+1}(t_{\phi+1} - t_{rv}^H - \Delta t) + \Pi_{rv}^{\phi+2}(t_{\phi+2} - t_{\phi+1}) + K + \Pi_{rv}^\beta(t^* - t_{\beta-1})].$$

Аналогично 1-му случаю выражение в квадратных скобках уменьшилось на величину $\Pi_{rv}^\phi \Delta t' + \Pi_{rv}^{\phi+1} \Delta t''$, где $\Delta t' + \Delta t'' = \Delta t$.

Следовательно, $\Delta Q'_{ir}(t^*)$ также увеличилось. Увеличивая t_{rv}^H на Δt , ($t_{rv}^H + 2\Delta t = t_{rv}^{H1} + \Delta t$), отмечаем, что $\Delta Q''_{ir}(t^*) \geq \Delta Q'_{ir}(t^*)$ и т.д. до t_{ij}^k , т.е. значения функции $\Delta Q_{ir}(t^*)$ на интервале (t', t'') монотонно не убывают. Так как t^* выбрано произвольно, в интервале (t', t'') , можно утверждать, что функция $\theta(t^* \in (t', t''))$ монотонно не убывает.

Алгоритмом предусматриваются процедуры формирования фронта работ, заключающегося в выборке из объектов и работ, технологически готовых к выполнению в данный момент времени.

В качестве исходных используются директивные (установленные договорами подряда) и плановые сроки с ограничениями типа «начать не раньше», «начать не позже», «начать точно в срок», время начала выполнения работ, их текущий объем, тип и параметр опережения.

Как правило, целью деятельности строительной организации при основной известной численности трудовых ресурсов является максимальный выпуск строительной продукции. Это достигается рациональной концентрацией трудовых ресурсов на возводимых объектах, что приводит к минимизации простоя фронта работ и ритмичной сдаче объектов в эксплуатацию [6–8].

В практике строительного производства применяются следующие правила назначения, наибольшему и наименьшему времени простоя исполнителей, по минимуму времени передислокации, наибольшей производительности труда на наибольший объем работ [9,10].

Вывод. Современная цифровая экономика строительной отрасли, основанная на БИМ-технологиях, позволит перейти к эффективному управлению проектами в условиях виртуальной реальности и минимизации основных критериев по времени и ресурсам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. П е т у х о в а А.В. BIM в области промышленного и гражданского строительства и новые перспективы инженерно-графической подготовки студентов вузов // Инновационные технологии в инженерной графике: проблемы и перспективы: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. 20 апреля 2016 г. Брест, Республика Беларусь, Новосибирск, Российская Федерация / отв. ред. Т.Н. Базенков. Брест: БрГТУ, 2016. 188 с.
2. М и р о ш и ч е н к о С.В., В о р о б ѿ в В.С. Система рационального управления строительным комплексом региона и его инфраструктурой // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 11-12. С. 38.
3. В о р о б ѿ в В.С., Б о б р о в а Т.В., П о п о в А.М., П о п о в а Ю.В. Управление поставками полупродукта при реализации строительных проектов в зонах индустриального освоения // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 9 (703).
4. В о р о б ѿ в В.С., М а н а к о в А.Л. Технологическая имитационная модель в системе сквозного планирования капитального ремонта линейно- рассредоточенных объектов // Наука и техника транспорта. 2013. № 1. С. 20–25.
5. Б а л о в а Н.А. Экономические проблемы регионов и отраслевых комплексов // Проблемы современной экономики. 2010. № 2 (34).
6. В а с и л е в с к и й С.Н. Измерение процессов СМК в строительстве // Методы менеджмента качества. 2010. № 2. С. 41–45.
7. К о ж е м я к и н а О.П., Г у с е в а Е.Н. Применение имитационного моделирования для совершенствования деятельности строительной фирмы // Современная техника и технологии. 2015. № 6.
8. А б р а м о в И.Л. Моделирование технологических процессов в малоэтажном строительстве: автореф. М., 2007.
9. Г и н з б у р г А.В., Цыбульская О.М. Системы автоматизации организационно-технологического проектирования // Вестн. МГСУ. 2008. С. 352–357.
10. К а л ю ж н ю к М.М., К а л ю ж н ю к А.В. Организация строительных процессов: основы теории структурно-функционального моделирования// Вестн. гражд. инженеров. 2015. № 3(50). С. 131–139.

Воробьев Валерий Степанович, д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Синицына Анастасия Сергеевна, асп.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Каталымова Ксения Валерьевна, канд. экон. наук, директор по правовой и кадровой работе ОАО «Новосибирскавтодор», г. Новосибирск

Запашникова Наталья Петровна, канд. техн. наук, доц.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено после доработки 16.04.18

Vorob'ev Valeriy Stepanovich, DSc, Professor

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Sinitsyna Anastasiya Sergeevna, Post-graduate Student

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Katalymova Kseniya Valer'evna, PhD, Director for Legal and Personnel Work of Novosibirskavtodor OJSC, Russia

Zapashchikova Natal'ya Petrovna, PhD, Ass. Professor

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

IMITATION MODELING IN THE STRUCTURE

OF CREATION OF BIM TECHNOLOGIES

OF CONSTRUCTION PROJECTS

An imitation model for the creation of modern BIM-technologies in the building complex, oriented to the implementation of virtual technologies, methods for organizing the construction and processing of large data sets in real time, in essence reflecting expert systems, is proposed. The model reflects the structure of the construction industry and its resource support; it is represented by a set of modules forming the order of construction of facilities, checking the planning (planned) construction dates, forming the work front and checking the parameters for advancing the appointment of contractors and construction equipment, supplying material resources, construction process and calculation of technical and economic indicators, parameters of construction production. A mathematical apparatus for describing potential production situations with variations of performers, construction equipment, SMR volumes, seasonality of their implementation is proposed and justified. The use of this model in the framework of the development of the digital economy will allow us to move to the management of projects in the conditions of virtual reality.

К e y w o r d s: model, construction production, performance of work, productivity, probability.

REFERENCES

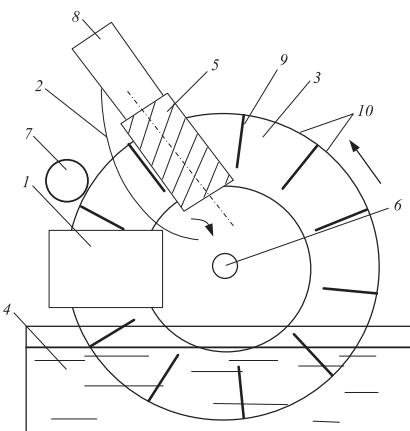
1. Petukhova A.V. BIM v oblasti promyshlennogo i grazhdanskogo stroitel'stva i novye perspektivy inzhenerno-graficheskoy podgotovki studentov vuzov [BIM in the field of industrial and civil construction and new perspectives of engineering and graphic training of university students]. Innovatsionnye tekhnologii v inzhenernoj grafike: problemy i perspektivy: sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 20 aprelya 2016 g. Brest, Respublika Belarus', Novosibirsk, Rossiyskaya Federatsiya / otv. red. T.N. Bazenkov [Innovative technologies in engineering graphics: problems and perspectives: a collection of proceedings of the International Scientific and Practical Conference April 20, 2016 Brest, Republic of Belarus, Novosibirsk, Russian Federation / ed. T.N. Bazenkov]. Brest: BrGTU, 2016. 188 p. (in Russian)

2. Miroshnichenko S.V., Vorob'ev V.S. Sistema ratsional'nogo upravleniya stroitel'nym kompleksom regiona i ego infrastrukturoy [The system of rational management of the construction complex of the region and its infrastructure]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2013. No. 11–12. P. 38. (in Russian)
3. Vorob'ev V.S., Bobrova T.V., Popov A.M., Popova Yu.V. Upravlenie postavkami poliprodukta pri realizatsii stroitel'nykh proektor v zonakh industrial'nogo osvoeniya [Management of polyproduct deliveries in the implementation of construction projects in the zones of industrial development]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 9 (703). (in Russian)
4. Vorob'ev V.S., Manakov A.L. Tekhnologicheskaya imitatsionnaya model' v sisteme skvoznogo planirovaniya kapital'nogo remonta lineyno-rassredotochennykh ob'ektov [Technological simulation model in the system of through planning of capital repairs of linearly dispersed objects]. Nauka i tekhnika transporta [Science and technology of transport]. 2013. No. 1. Pp. 20–25. (in Russian)
5. Balova N.A. Ekonomicheskie problemy regionov i otrazhennykh kompleksov [Economic problems of regions and branch complexes]. Problemy sovremennoy ekonomiki [Problems of the modern economy]. 2010. No. 2 (34). (in Russian)
6. Vasilevskiy S.N. Izmerenie protsessov SMK v stroitel'stve [Measuring QMS processes in construction]. Metody menedzhmenta kachestva [Methods of quality management]. 2010. No. 2. Pp. 41–45. (in Russian)
7. Kozhemyakina O.P., Guseva E.N. Primenenie imitatsionnogo modelirovaniya dlya sovershenstvovaniya deyatel'nosti stroitel'noy firmy [The use of simulation to improve the activities of a construction firm]. Sovremennaya tekhnika i tekhnologii [Modern technology and technology]. 2015. No. 6. (in Russian)
8. Abramov I.L. Modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov v maloetazhnom stroitel'stve: avtoreferat [Modeling of technological processes in low-rise construction: abstract]. Moscow, 2007. (in Russian)
9. Ginzburg A.V., Tsybul'skaya O.M. Sistemy avtomatizatsii organizatsionno-tehnologicheskogo proektirovaniya [Systems of automation of organizational and technological design]. Vestnik MGSU [Bulletin of MSSU]. 2008. Pp. 352–357. (in Russian)
10. Kalyuzhnyuk M.M., Kalyuzhnyuk A.V. Organizatsiya stroitel'nykh protsessov: osnovy teorii strukturno-funktional'nogo modelirovaniya [Organization of construction processes: the foundations of the theory of structural-functional modeling]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Herald of Civil Engineers]. 2015. No. 3(50). Pp. 131–139. (in Russian)

СПОСОБ ОЧИСТКИ ВОДОПРОВОДНОЙ ВОДЫ

На протяжении нескольких последних лет разрабатывались различные, все более эффективные способы очистки водопроводной воды. Это относится к новой технологии очистки, которая была создана в Тихоокеанском государственном университете. Сущность метода заключается в получении талой воды, которая обладает не только обеззараживающим, но и лечебным действием. При замораживании воды ее кристаллическая решетка способствует вытеснению вредных примесей, таких как дейтерий, что положительно влияет на здоровье человека. Очистка водопроводной воды происходит в водоочистителе, содержащем зону подачи воды, зону замораживания с морозильной камерой, зону перехода воды из твердого состояния в жидкое с отделением льда, вывод талой питьевой воды.

Принцип работы устройства. В качестве зоны подачи воды используют вертикальное металлическое кольцо 3, которое замораживают в морозильной камере 1, часть его погружают в сосуд с водой 4 и вращают. Вращение металлического кольца выполняют прижимным роликом 7 с упругим бандажом. Отделение льда от поверхности металлического кольца осуществляют прижимными рябухами 5 с приводом вращения 8. Для отделения льда от металлического кольца дополнительно изгибают поверхность металлического кольца за счет расположенных у его внешнего края радиальных прорезей 9, образующих изгибающиеся лопасти 10, под действием усилия, создаваемого прижимными рябухами 5 (рисунок).



Устройство для очистки водопроводной воды

1 – морозильная камера; 2 – раздельные патрубки для вывода талой питьевой воды; 3 – вертикальное металлическое кольцо; 4 – сосуд с водой; 5 – прижимные рябухи; 6 – ось; 7 – прижимной ролик; 8 – привод вращения; 9 – прорези; 10 – лопасти

Преимущество предложения:

- использование металлического кольца с лопастями увеличивает надежность отделения льда от металлического кольца, так как рябухи деформируют лопасти и лед легко откалывается с поверхности металлического кольца;
- предлагаемый способ очистки водопроводной воды позволяет повысить скорость и производительность получения талой воды.

На изобретение получен патент.

Разработчик

Богачев Анатолий Петрович, канд. техн. наук, доц.
E-mail: bogachev27@mail.ru

Тихоокеанский государственный университет, отдел промышленной и интеллектуальной собственности

680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136

Тел.: +7(4212) 22 44 10; 8 800 250 80 10

Сайт: pnu.edu.ru

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
«СТРОИТЕЛЬСТВО»

Издаётся с марта 1958 г.

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

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

ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ ЖУРНАЛА:

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

Принимается подписка
на 1-е полугодие по каталогу «Роспечать» 2018 г.

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

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

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

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

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

Внимание!

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

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

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

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

ББК 38
И 33
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО**

№ 5 (713) 2018

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*
Технический редактор *Н.М. Макаренко*
Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*
Корректор *Г.И. Шведкина*

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 28.05.18. Формат 70×108 1/16
Усл. печ. л. 10,15+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 2696

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