

ISSN 2073-1523

ИЗВЕСТИЯ

Казанского
Государственного
Архитектурно-
Строительного
Университета

№ 1(59)/2022

16+



NEWS



Kazan

State

University

Architecture

Engineering

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА, АРХИТЕКТУРЫ
И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА РТ
МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И ДОРОЖНОГО ХОЗЯЙСТВА РТ

Известия КГАСУ

2022 г., № 1 (59)

ББК 38
И 33
УДК 69

Главный редактор: д-р техн. наук, проф. чл.-корр. АН РТ Р.К. Низамов
Зам. главного редактора: канд. техн. наук, доц. Е.А. Вдовин

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Айдарова Г.Н., д-р арх., проф. советник РААСН;	Мирсаяпов Илизар Т., д-р техн. наук, проф.;
Гагарин В.Г., д-р техн. наук, проф. чл.-корр. РААСН;	Мирсаяпов Ильшат Т., д-р техн. наук, проф.;
Горячев М.Г., д-р техн. наук, проф.;	Стрелков А.К., д-р техн. наук, проф.;
Есаулов Г.В., д-р арх., проф., академик РААСН;	Строганов В.Ф., д-р хим. наук, проф., почетный член РААСН;
Ильичев В.А., д-р техн. наук, проф., первый вице-президент РААСН;	Сулейманов А.М., д-р техн. наук, проф. чл.-корр. АН РТ;
Каюмов Р.А., д-р физ.-мат. наук, проф.;	Тунакова Ю.А., д-р хим. наук, проф.;
Кичигин В.И., д-р техн. наук, проф.;	Углова Е.В., д-р техн. наук, проф.;
Королев Е.В., д-р техн. наук, проф.;	Хозин В.Г., д-р техн. наук, проф.;
Кочев А.Г., д-р техн. наук, проф.;	Шагидуллин Р.Р., д-р хим. наук, чл.-корр. АН РТ;
Логачев К.И., д-р техн. наук, проф.;	Яковлев Г.И., д-р техн. наук, проф.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Рольф Катценбах, д-р техн. наук, проф. (Германия);	Фишер Х.-Б., доктор-инженер (Германия);
Фиговский О.Л., д-р техн. наук, проф., член Европейской АН, иностранный член РААСН (Израиль);	Хассан Абдалла, д-р наук (PhD), проф. (Великобритания);
	Янотка И., д-р техн. наук, с.н.с. (Словакия).

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:

ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, определяемый Высшей аттестационной комиссией (ВАК), рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук. Статьи рецензируются. Перепечатка без разрешения редакции запрещена, ссылки на журнал при цитировании обязательны.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-25136 от 20 июля 2006 г.). Включен в общероссийский каталог ОАО Агентства «РОСПЕЧАТЬ», индекс издания – 36939.

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1, ком. 79
Тел. (843) 510-46-39, факс (843) 238-37-71
E-mail: patent@kgasu.ru Сайт: <http://izvestija.kgasu.ru>

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION

KAZAN STATE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE AND ENGINEERING

MINISTRY OF CONSTRUCTION, ARCHITECTURE AND HOUSING
OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN

MINISTRY OF TRANSPORT AND ROADS
OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN

News of the KSUAE 2022, № 1 (59)

BBC 38
I 33
UDC 69

Editor-in-Chief: Dr. tech. sci., prof. corr.-m. AS RT Nizamov R.K.
Deputy Editor-in-Chief: Cand. tech. sci., associate prof. Vdovin E.A.

EDITORIAL BOARD:

Aidarova G.N. Dr. arch. sci., prof., advisor of RAACS;	Mirsayapov Ilizar T., Dr. tech. sci., prof.;
Gagarin V.G., Dr. tech. sci., prof. corr.-m. of RAACS;	Mirsayapov Ilshat T., Dr. tech. sci., prof.;
Goriachev M.G., Dr. tech. sci., prof.;	Strelkov A.K., Dr. tech. sci., prof.;
Esaulov G.V., Dr. arch. sci., prof., member of the	Stroganov V.F., Dr. chem. sci., prof., honorary m.
Academy of RAACS;	of RAACS;
Ilichev V.A., Dr. tech. sci., prof., First Vice	Suleimanov A.M., Dr. tech. sci., prof. corr.-m. AS RT;
President of RAACS;	Tunakova Iu.A., Dr. chem. sci., prof.;
Kayumov R.A., Dr. phys-mat. sci., prof.;	Uglova E.V., Dr. tech. sci., prof.;
Kichigin V.I., Dr. tech. sci., prof.;	Khazin V.G., Dr. tech. sci., prof.;
Korolev E.V., Dr. tech. sci., prof.;	Shagidullin R.R., Dr. chem. sci., corr.-m. AS RT;
Kochev A.G., Dr. tech. sci., prof.;	Iakovlev G.I., Dr. tech. sci., prof.
Logachev K.I., Dr. tech. sci., prof.;	

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD:

Rolf Katzenbach, Dr. tech. sci., prof. (Germany);	Fischer H.-B., Dr.-Ing (Germany);
Figovskiy O.L., Dr. tech. sci., prof., member of	Hassan Abdalla, PhD, prof. (Great Britain);
EAS, foreign member of RAACS (Israel);	Janotka I., Dr. tech. sci., head of unit (Slovakia).

THE FOUNDER AND THE PUBLISHER:

FSBEI of HE «Kazan State University of Architecture and Engineering»

The journal is included in the index of leading reviewed scientific journals and editions, defined by the Higher Attestation Commission, and recommended for publication of basic scientific results of dissertations on scientific degree of the doctor and the candidate of sciences. The articles are reviewed. Reproduction without the permission of editors is prohibited; citing references to the journal are obligatory.

It is registered by Federal agency on surveillance of legislation observance in sphere of mass communications and cultural heritage protection (the certificate on registration PI № FS77-25136, dated July, 20th, 2006). It is included in the all-Russian catalogue of JSC «ROSPECHAT» Agency; subscription number 36939.

EDITORIAL ADDRESS:

420043, Kazan, Zelenaya 1, office 79
Tel. (843) 510-46-39, fax (843) 238-37-71
E-mail: patent@kgasu.ru Web-site: <http://izvestija.kgasu.ru>



СОДЕРЖАНИЕ



ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ		
Мирсаяпов Илизар Т., Гараев А.И. Особенности расчета напряженно-деформированного состояния плитно-свайных фундаментов при режимных циклических и циклических нагрузках	6	
Шакиров М.И. Деформации грунтовых оснований плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении	19	
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ		
Куприянов В.Н. Оценка и регулирование конденсации водяного пара в ограждающих конструкциях	29	
Палагин Н.Г., Никитин Г.П., Трунов А.Н. Экономическая эффективность колонн прямоугольного сечения одноэтажных производственных зданий с мостовыми кранами из высокопрочного песчаного бетона	41	
СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ		
Фомин А.Ю., Аскарлова Р.Н., Хозин В.Г. Высокопрочный серощебень из карбонатных пород для устройства оснований в конструкциях дорожных одежд	54	
ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА		
Мухаметрахимов Р.Х., Зиганшина Л.В. Технология и контроль качества строительной 3D-печати	64	
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ		
Садыков Р.А., Мухаметзянова А.К., Джунусова Л.Р., Елеманова А.А. Моделирование процессов опреснения воды в комбинированной водоподготовительной установке	80	
Садыков Р.А., Мухаметзянова А.К., Филимонова С.А. Аналитический и численный расчеты квазиустановившегося режима теплопереноса в ограждающих конструкциях зданий и сооружений	90	
ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ		
Бусарев А.В., Шешегова И.Г., Мамаков И.Д. Исследование процессов глубокой очистки сточных вод с применением скорых напорных фильтров	103	
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ		
Петропавловских О.К., Ибрагимова А.А., Садыков Р.Р., Галиев А.Р., Губайдуллин Р.Ф. Совершенствование системы водоотвода с мостового полотна автодорожных мостов	113	
ТЕОРИЯ И ИСТОРИЯ АРХИТЕКТУРЫ, РЕСТАВРАЦИЯ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ИСТОРИКО-АРХИТЕКТУРНОГО НАСЛЕДИЯ		
Мухитов Р. К., Будкевич Н. М. Проблемы идентификации объектов индустриального наследия	126	
Правила представления материалов для публикации в научном журнале «Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета»	138	



CONTENTS



FOUNDATIONS, UNDERGROUND STRUCTURES	
Ilizar T. Mirsayapov, A.I. Garaev Features of the calculation of the stress-strain state of slab-pile foundations under regime cyclic and cyclic loading	6
M.I. Shakirov , Raft-pile foundation ground base deformation under cyclic loading/	19
BUILDING STRUCTURES, HOUSES	
V.N. Kupriyanov , Evaluation and regulation of water vapor condensation in enclosing structures	29
N.G. Palagin, G.P. Nikitin, A.N. Trunov . Economic efficiency of manufacturing rectangular columns of one-story industrial buildings with overhead cranes from high-strength sand concrete Abstract	41
BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS	
A.Y. Fomin, R.N. Askarova, V.G. Khozin High-strength crushed stone from carbonate rocks for the arrangement of bases in road pavement structures	54
TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION	
R. Kh. Mukhametrakhimov, L.V. Ziganshina Technology and quality control of 3DCP	64
HEATING, VENTILATION, AIR CONDITIONING, GAS SUPPLY AND LIGHTING	
R.A. Sadykov, A.K. Mukhamtezhianova, L.R. Junussova, A.A. Elemanova Simulation of water desalination processes in a combined water treatment plant	80
R.A. Sadykov, A.K. Mukhametzhianova, S.A. Filimonova Analytical and numerical calculations of the quasi-steady-state heat transfer mode in the enclosing structures of buildings and structures	90
WATER SUPPLY, SEWERAGE, BUILDING SYSTEMS FOR THE PROTECTION OF WATER RESOURCES	
A.V. Busarev, I.G. Sheshegova, I.D. Mamakov Study of deep wastewater treatment processes using high-pressure filters	103
DESIGN AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AERODROMES, BRIDGES AND TRANSPORT TUNNELS	
O.K. Petropavlovskikh, A.A. Ibragimova, R.R. Sadykov, A.R. Galiev, R.F. Gubaidullin , Improving the drainage system from the bridge deck of road bridges	113
ARCHITECTURE THEORY AND HISTORY. HISTORICAL AND ARCHITECTURAL HERITAGE RESTORATION AND RECONSTRUCTION	
R.K. Mukhitov, N.M. Budkevich Problems of identification of industrial heritage	126
Rules of representation of materials for the publication in scientific journal «Kazan State University of Architecture and Engineering news»	138



DOI: 10.52409/20731523_2022_1_6
УДК 624.131

Особенности расчета напряженно-деформированного состояния плитно-свайных фундаментов при режимных циклических и циклических нагружениях.

И.Т. Мирсаяпов¹, А.И. Гараев¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г.Казань, Российская Федерация

Аннотация: целью исследования является рассмотрение различных особенностей расчета напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента (ПСФ) при различных видах нагружений. Основная задача данной работы – это выполнить анализ существующих методов расчета плитно-свайных фундаментов при различных видах нагружения. Актуальность затрагиваемой проблемы вызвана отсутствием методики расчета, которая достоверно бы давала сведения о совместной работе плитно-свайного фундамента и окружающего его грунта при режимном циклическом нагружении. При этом существующие методики расчета разработаны для случая циклического нагружения с параметрами, постоянными во времени. В то же время, в реальных условиях эксплуатации многих сооружений, параметры циклического нагружения меняются на различных этапах технологических процессов.

Проведено теоретическое исследование различных методик расчета несущей способности и осадки плитно-свайного фундамента в зависимости от различных видов взаимодействия и изменения напряженно-деформированного состояния происходящее между основными элементами плитно-свайного фундамента и окружающим его массивом грунта, а также элементов между собой при различных видах нагружения.

Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в том, что анализ различных методик расчета напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента при разных видах нагружения позволяет оценить подходы авторов к этим расчетам и определить какие условия взаимодействия системы «фундамент – грунтовый массив» остались открытыми и при каких видах нагружения.

Ключевые слова: плитно-свайный фундамент, свая, фундаментная плита, осадки, несущая способность.

Для цитирования: И.Т.Мирсаяпов, А.И.Гараев Особенности расчета напряженно-деформированного состояния плитно-свайных фундаментов при режимных циклических и циклических нагружениях//Известия КГАСУ.2022. №1 (59). С 6-18.

DOI: 10.52409/20731523_2022_1_6

Features of the calculation of the stress-strain state of slab-pile foundations under regime cyclic and cyclic loading.

I.T.Mirsayapov¹, A.I.Garaev¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract: problem statement. The purpose of the study is to consider various features of the calculation of the stress-strain state of the slab-pile foundation under various types of loads. The main task of this work is to analyze the existing methods of calculating slab-pile foundations under various types of loading. The urgency of the problem is caused by the lack of a calculation

methodology that would reliably provide information about the joint work of the slab-pile foundation and the surrounding soil under regime cyclic loading. At the same time, the existing calculation methods have been developed for the case of cyclic loading with parameters constant in time. At the same time, in the actual operating conditions of many structures, the parameters of cyclic loading change at various stages of technological processes. A theoretical study of various methods for calculating the bearing capacity and settlement of a slab-pile foundation was carried out, depending on various types of interaction and changes in the stress-strain state occurring between the main elements of the slab-pile foundation and the surrounding soil mass, as well as elements with each other under various types of loading. The significance of the obtained results for the construction industry lies in the fact that the analysis of various methods for calculating the stress-strain state of a slab-pile foundation under different types of loading allows us to evaluate the authors' approaches to these calculations and determine what conditions for the interaction of the "foundation-soil mass" system remained open and under what types of loading.

Key words: slab-pile foundation, pile, foundation slab, precipitation, bearing capacity.

For citation: I.T. Mirsayapov, A.I. Garaev Features of the calculation of the stress-strain state of slab-pile foundations under regime cyclic and cyclic loading // News KSUAE 2022. №1 (59). С 6-18. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_6

1. Введение

Одним из более действенных методик увеличения несущей при больших уровнях нагрузки и негативных грунтовых условиях считается использование ПСФ.

Важной задачей при проектировании зданий и сооружений, является оценка несущей способности и прогноз развития осадок фундаментов. Установление НДС плитно-свайного фундамента представляет из себя задачу с несколькими неизвестными, поскольку в основании фундамента находятся материалы с различными деформационными и прочностными характеристиками и все эти деформации развиваются в связных условиях [1-4].

Особенности расчета плитно-свайных фундаментов (ПСФ) заключаются в решении системы «фундамент-грунтовое основание». При решении данной систем необходимо ответить на такие задачи как, определение осадки фундамента (осадка плитного фундамента и группы свай), определение распределения напряжений и развитие деформаций при совместной работе плитно-свайного фундамента и окружающего его массива грунта, а также элементов ПСФ между собой при нагружении их режимными циклическими нагрузками [5-6].

Методики определение осадки ПСФ была предложены в действующем нормативном документе СП 24.13330.2011 и в работах таких авторов как Мирсаяпова И. Т. и Шакирова М. И. [7-10], Мангушева Р. А. и Фадеева А. Б. [11], Тер-Мартirosян З. Г., Чинь Т. В. [12], Самородов А.В. [13]. Для всех этих методик характерно то, что для расчета КСПФ не обходимо учитывать различные виды взаимодействия между сваей и грунтом, плитой и грунтом, влияние свай друг на друга через грунт и взаимное влияние свай и плиты ростверка.

Методики определение несущей способности ПСФ были предложены в работах таких авторов как Мирсаяпов И. Т и Шакиров М. И. [7-8], Артемьев Д. А. [14], Самородов А. В [13].

Поведение компонентов плитно-свайного фундамента с окружающим грунтовым массивом при определении напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента были рассмотрены многими авторами. Так, например, при определении осадки плитно-свайного фундамента учитываются различные факторы и особенности, одной и таких особенностей является дополнительная осадка плитно-свайного фундамента за счет деформации ствола сваи. Такими авторами как, Тер-Мартirosян З. Г. и Чинь Т. В. в работе [15]. В работе [16] авторов Уткина В. С., Сушева Л. А., Соловьева С. А., была предложена методика определения осадки сваи за счет сжатия ствола сваи с учетом сил трения по боковой поверхности. На основании экспериментальных исследований в работе [17]. Готмана А. Л. и Гаврикова М. Д. была разработана методика определения осадок

ствола сваи с возникновением дополнительных осадок по мере увеличения нагрузок. В работе Готмана Н. З., Алехина В. С., Сергеева Ф. В. [18] описывается способ нахождения несущей способности грунта под подошвой сваи в составе группы свай. Способ определения напряженно-деформированного состояния, основывается на результатах испытаний, проведенных для сваи в составе группы свай и для одной сваи.

Данные методики расчета позволяют рассматривать изменение напряженно-деформированного состояния системы «плитно-свайный фундамент – грунтовый массив» при действии кратковременного статического нагружения и постоянного циклического нагружения и не рассматривают изменения нагружений которые меняются на различных этапах эксплуатации зданий и сооружений, что является актуальной проблемой. В связи с этим целью исследования является разработка методики расчета напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента при действии режимного циклического нагружения. Для достижения цели необходимо:

- изучить методики расчета напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента при статическом нагружении;
- изучить методики определения напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента и грунтового основания при режимном циклическом нагружении;
- изучить методики расчета несущей способности и осадки плитно-свайного фундамента с учетом изменения напряженно-деформированного состояния при режимных циклических нагружениях.

2. Материалы и методы

При определении напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента от действия различного рода нагрузок необходимо учитывать различные виды взаимодействия, возникающие в процессе их совместного деформирования. Данные особенности были рассмотрены авторами при определении осадки и несущей способности плитно-свайного фундамента путем рассмотрения системы «плитно-свайный фундамент – грунт».

Методики расчета осадки плитно-свайного фундамента

Методика расчета, предложенная в СП 24.13330.2011, состоит в определении трех частей:

$$s = s_{ef} + \Delta s_p + \Delta s_c \quad (1)$$

где s_{ef} – осадка условного фундамента;

Δs_p – дополнительная осадка за счет продавливания сваи;

Δs_c – дополнительная осадка за счет сжатия ствола сваи.

Расчет осадки условного фундамента s_{ef} производят методом послойного суммирования деформаций линейно-деформируемого основания с условным ограничением сжимаемой толщи согласно СП 22.13330.2016.

Величина деформации грунта продавливания Δs_p является переменной и зависит от шага свай в свайно-плитном фундаменте. Расчет выполняется методом ячейки в упругопластической постановке.

Расчет осадки за счет сжатия ствола сваи заключается в том, что сжатие ствола сваи происходит под действием внешней нагрузки по законам линейной деформации.

В работах [7-10] за расчетную схему была принята модель, состоящая из плитного ростверка, жестко соединенного со сваями и окружающий его массив.

Осадку плитно-свайного фундамента при действии многократно повторяющейся циклической нагрузки вычисляется по выражению:

$$S(N) = S_{ef}(N) + \Delta S_p(N) + \Delta S_c(N) \quad (2)$$

где $S_{ef}(N)$ – деформации при действии многократно повторяющейся нагрузки условного фундамента;

$\Delta S_p(N)$ – деформации при действии многократно повторяющейся нагрузки за счет продавливания основания сваи;

$\Delta S_c(N)$ – деформации при действии многократно повторяющейся нагрузки за счет сжатия ствола сваи.

Осадку условного фундамента вычисляется из выражения:

$$S_{ef}(N) = \sum_{i=1}^n [\varepsilon_{z,i}(t, t_0)] * h_i \quad (3)$$

где h_i – высота i -го слоя грунта;

n – число слоев сжимаемой толщи;

t – промежуток времени, зависящий от начала момента наблюдения и количества циклов нагружения N ;

$\varepsilon_{z,i}(t, t_0)$ – деформации i -го слоя при действии циклической нагрузки t ;

t_0 – промежуток времени равный периоду 1-ому циклу нагружения;

h_i – высота i -го слоя грунта.

Осадки при действии повторяющейся нагрузки за счет деформирования основания сваи определяются исходя из формулы:

$$\Delta S_c(N) = \frac{\sigma_c^{max}(N_1)(l - a)}{E_b(N_1)} + \frac{\varepsilon_{pl}^{rp}(N) * (l - a)}{\left[1 + \frac{E_b(N)}{E_{rp}(N)} * \frac{A_{св}}{A_{rp}}\right]} \quad (4)$$

где $E_b(N)$ – коэффициент пропорциональности между нормальным напряжением и соответствующей ему относительной продольной упругомгновенной деформацией сваи при действии многократно повторяющейся нагрузки;

$A_{св}$ – площадь сваи, образованная пересечением продолговатого тела с воображаемой плоскостью, расположенных перпендикулярно друг другу;

$E_{rp}(N)$ – характеристика изменений грунта, возникающих под воздействием разных типов нагрузок при действии многократно повторяющейся нагрузки;

$\varepsilon_{pl}^{rp}(N)$ – деформации в дисперсных грунтах при длительных динамических нагрузках вследствие ослабления взаимодействия между частицами и их взаимной переупаковки;

$G_v(N)$ – характеристика деформируемости, определяемая отношением приложенного к грунту касательного напряжения к углу сдвига при действии многократно повторяющейся нагрузки;

$K_v(N)$ – объемный модуль деформации грунта при действии многократно повторяющейся нагрузки;

σ_c^{max} – максимальное давление в стволе сваи;

A_{rp} – площадь грунта рассматриваемой ячейки;

l – продольный размер сваи.

Осадки при действии повторяющейся нагрузки за счет деформирования ствола сваи определяется по формуле:

$$\Delta S_p(N) = \alpha_{св} \left[\frac{P_3(N)}{G_v(N)} - \left(\frac{P_3(N) + 2P_3(N) \cos B}{3} \right) * \frac{3K_v(N) - G_v(N)}{3K_v(N) - G_v(N)} \right] \quad (5)$$

где $P_3(N)$ – давление в основании сваи;

$\alpha_{св}$ – размер сваи, образованный пересечением продолговатого тела с воображаемой плоскостью, расположенных перпендикулярно друг другу.

В работе Фадеева А. Б. и Мангушева Р. А. [11] осадка плитно-свайного фундамента (ПСФ) определяется из двух компонентов:

$$S_{п.с} = S_1 + S_2 \quad (6)$$

Первая компонента осадки S_1 , представляет собой осадку плитного ростверка и зависит от доли нагрузки, передаваемой на грунтовое основание плитным ростверком:

$$S_1 = (1 - \alpha) S_{п} \quad (7)$$

где α – доля нагрузки, приходящаяся на сваю;

$S_{п}$ – осадка плитного ростверка.

Вторая компонента осадки S_2 , представляет собой осадку свай и зависит от доли нагрузки передаваемой сваи определяемая сжимаемостью подсвайной толщи:

$$S_2 = \alpha S_c \quad (8)$$

где S_c – осадка сваи.

В работе [12] для определения осадки плитно-свайного фундамента рассматривает задачу, по количественной оценке, напряженно-деформированного состояния (НДС) ячейки ПСФ.

Осадка сваи в составе плитно-свайного фундамента рассматривается в зависимости трех слагаемых: сил трения T , от нагрузок в основании плитного ростверка P и от усилий, возникающих в основании свайного поля R . В связи с высокими значениями жесткости материала сваи во всех 3-х случаях осадки считаются одинаковыми, т.е.:

$$S_c = S_1(T) = S_2(P) = S_3(R)$$

Осадка сваи $S_1(T)$ от воздействия сил трения вычисляется по формуле:

$$S_1(T) = S_c = S_b + \frac{\tau_a}{3G} (b - a) \quad (9)$$

где G — модуль сдвига;

τ_a — значение касательных напряжений действующих по боковой поверхности сваи;

b — половина ширины ячейки плитно-свайного фундамента;

a — половина ширины сечения сваи.

В зависимости от действия усилий R в основании свайного фундамента осадка сваи $S_3(R)$ определяется по формуле:

$$S_3(R) = S_{св} = \frac{R(1 - \nu)K_1}{4aG} = \frac{R(1 - \nu)K_1}{2aE} \quad (10)$$

где K_1 — коэффициент, учитывающий длину сваи;

ν — коэффициент Пуассона;

R — напряжения возникающие под нижним концом сваи.

В зависимости от действия силы нагрузок P под ростверком, осадка сваи $S_2(P)$ определяется по формуле:

$$S_2(P) = \frac{PL}{E} \beta(\nu) \quad (11)$$

где L — высота столба грунта;

$\beta(\nu) = 0.8$;

E — модуль деформации грунта.

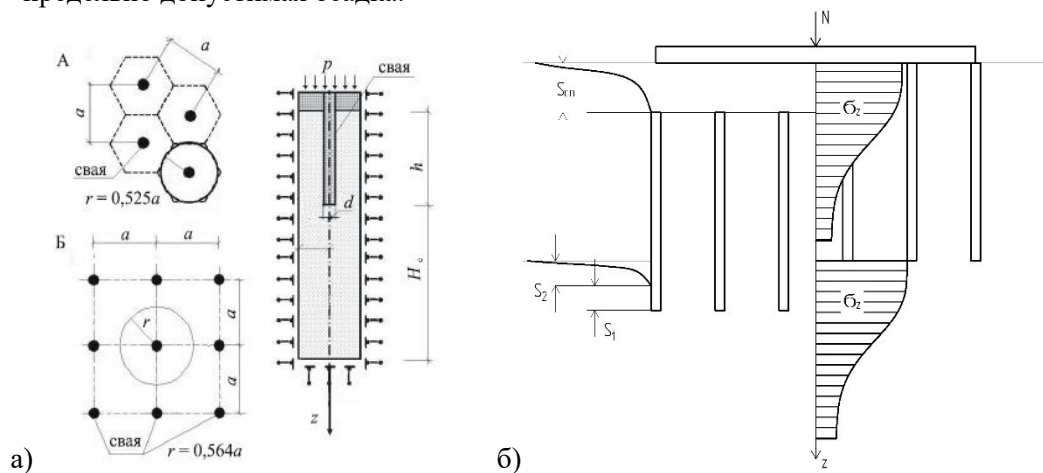
В работе Самородова А. В. [13] в основу определения осадки плитно-свайного фундамента лег обобщенный закон Гука для равномерно нагруженного слоя грунта. Условие для определения осадки плитно-свайного фундамента имеет вид:

$$S_{пл} + S_N \leq S_u \quad (12)$$

где $S_{пл}$ — осадка плитного ростверка;

S_N — осадка свайного поля;

S_u — предельно допустимая осадка.



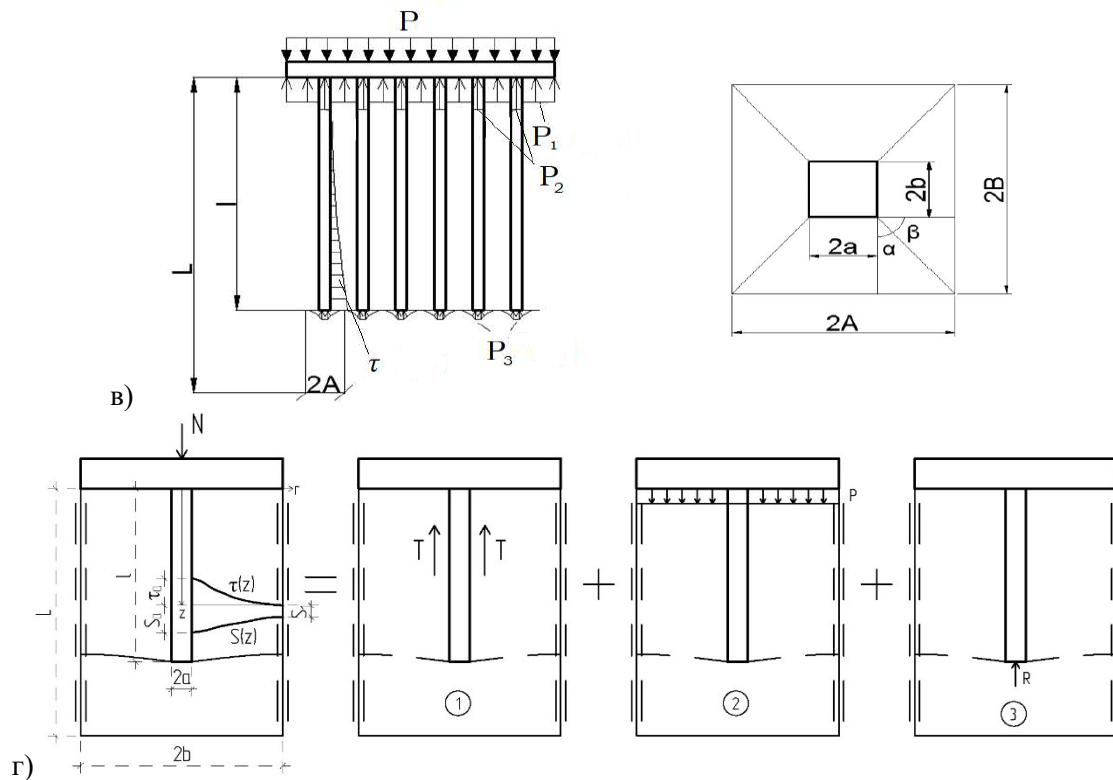


Рис. 1. Расчетные схемы: а) Метод ячейки [СП 24.13330.2011]; б) Схема к определению осадки плитно-свайного фундамента [11]; в) Схема взаимодействия плитно-свайного фундамента с грунтовым основанием [7]; г) Схема для определения осадки отдельной ячейки плитно-свайного фундамента [12].

Методики расчета несущей способности плитно-свайного фундамента

В работах [7-8] представляется методика определения несущей способности ПСФ при действии многократно повторяющейся циклической нагрузки. За расчетную схему была принята модель, состоящая из плитного ростверка, жестко соединенного со сваями и окружающий его массив (рис. 1в).

Несущая способность ПСФ определялась исходя из условий, что напряжения под пятой сваи $P_{3,i}(N)$ и напряжения на уровне оголовка сваи $P_{2,i}(N)$ не превышают предельные напряжения в грунте $\sigma_{1u}(N)$.

$$P_{2,i}(N) \leq \sigma_{1u}(N) \quad (13)$$

$$P_{3,i}(N) \leq \sigma_{1u}(N) \quad (14)$$

Напряжения возникающие при многократно повторяющейся нагрузки были определены из 4-х уравнения квазистатики и получены следующие уравнения:

Напряжения в грунте под ростверком вычисляются по формуле:

$$P_1(N) = \frac{P * AB - p_2(N) * ab}{(AB - ab)} \quad (15)$$

где P – равномерно распределенная нагрузка;

A, B – размеры рассматриваемой ячейки;

a, b – размеры сечения свай.

Давление на уровне вершины сваи выражается формулой:

$$\begin{aligned}
 P_2(N) = & \frac{P * G_{gr}(N) * AB * (AB - ab) * L * \beta_{gr} * \left(1 - \frac{1}{L}\right) + 0.33 * \tau_0(N) * E_{gr}(N) * (A - a) * (AB - ab) * k_1}{\alpha * \omega * (1 - \nu_{gr}) * k(l) * (AB - ab) * E_{gr}(N) + ab * \beta_{gr} * L * \left(1 - \frac{1}{L}\right) * G_{gr}(N)} \\
 & + \frac{0.33 * \tau_0(N) * E_{gr}(N) * (B - b) * (AB - ab) * k_2 - 4 * \frac{\tau_0(N)}{\alpha} * E_{gr}(N) * l * (AB - ab) * \omega * (1 - \nu_{gr}) * k(l)}{\alpha * \omega * (1 - \nu_{gr}) * k(l) * (AB - ab) * E_{gr}(N) + ab * \beta_{gr} * L * \left(1 - \frac{1}{L}\right) * G_{gr}(N)} \\
 & + \frac{\frac{\tau_0(N)}{\alpha} * E_{gr}(N) * \frac{a + b}{b} * l * (AB - ab) * e^{-\alpha l} * \omega * (1 - \nu_{gr}) * k(l)}{\alpha * \omega * (1 - \nu_{gr}) * k(l) * (AB - ab) * E_{gr}(N) + ab * \beta_{gr} * L * \left(1 - \frac{1}{L}\right) * G_{gr}(N)} \quad (16)
 \end{aligned}$$

где G – физическая величина, характеризующая способность материала сопротивляться сдвиговой деформации;

$k(l)$ – величина, учитывающая глубину приложения штампа на его длину;

ω – параметр, зависящий от формы рассматриваемой ячейки;

ν – упругая константа, величина отношения относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению;

$\alpha = 5/l$, где l – длина сваи.

Давление под основанием сваи рассчитывается из выражения:

$$p_3(N) = \frac{p_2(N) * 4ab + 4(a+b) * l * \frac{\tau_0(N)}{\alpha} - 4(a+b) * l * \frac{\tau_0(N)}{\alpha} * e^{-\alpha l}}{4ab} \quad (17)$$

где $\tau_0(N)$ – давление в возникающее за счет бокового трения по поверхности сваи при действии многократно повторяющейся нагрузки;

В работе [14] основываясь на ряд лабораторных испытаний была выдвинута гипотеза об образовании уплотненных зон и на основании данной гипотезы была составлена методика расчета несущей способности комбинированного плитно-свайного фундамента:

$$R_{\text{общ}} = \sum_{i=0}^n R_{\text{св}} + R_{\text{пл}} \quad (18)$$

$R_{\text{пл}}$ – максимальная нагрузка, воспринимаемая сваями:

$$R_{\text{св } i} = R_{\text{бок } i} + R_{\text{лоб } i} \quad (19)$$

где $R_{\text{бок } i}$ – величина нагрузки, воспринимаемая сваями за счет бокового трения, $R_{\text{лоб } i}$ – величина нагрузки, воспринимаемая подошвой сваи, $R_{\text{пл}}$ – величина нагрузки, воспринимаемая плитным ростверком:

$$R_{\text{пл}} = \int_0^{A_p} f(x) \sigma_{\text{гр}} dA_p \quad (20)$$

где $f(x)$ – параметр эпюры давления в грунте;

$\sigma_{\text{гр}}$ – давление в основании под плитным ростверком;

A_p – площадь основания плитного ростверка, без учета площади поперечного сечения свай.

В работе [13] несущая способность ПСФ $R_{\text{пл}}$ определяется из условия максимально допустимой осадки плитной части фундамента $S_{\text{пл}}$ и выражается формулой:

$$P_{\text{пл}} = \frac{d_1 + \sqrt{d_1^2 + \frac{4 * S_{\text{пл}} * E}{k * \gamma * \beta}}}{2} k * \gamma \quad (21)$$

где d_1 – размер поперечного сечения свай;

$S_{\text{пл}}$ – осадка плитной части;

k – коэффициент, принимаемый в зависимости от ширины подошвы фундамента;

γ – удельный вес грунта;

β – безразмерный коэффициент, равный 0,8;

E – модуль деформации грунта.

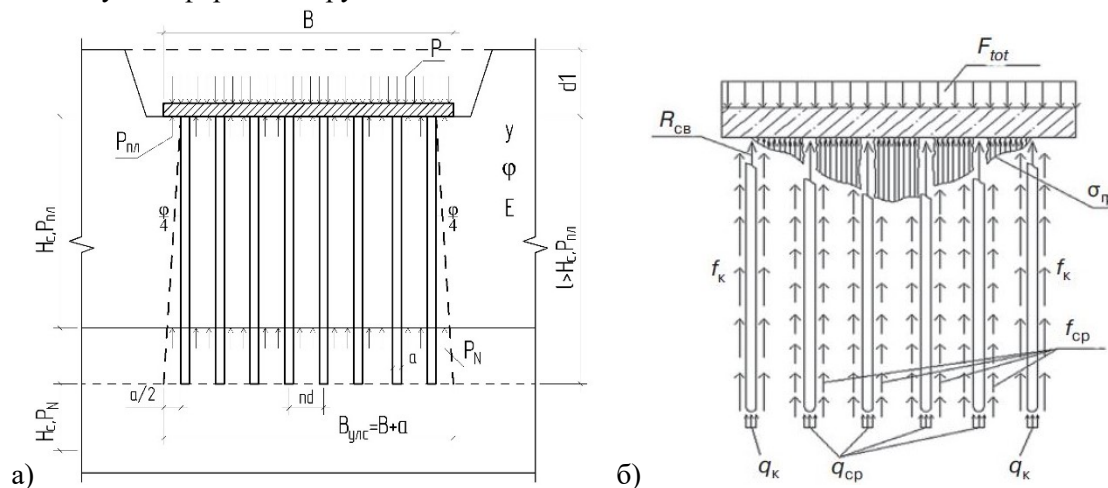


Рис. 2. Расчетные схемы: а) Расчетная схема взаимодействия плитно-свайного крупноразмерного фундамента с грунтовым массивом [13]; б) Расчетная схема плитно-свайного фундамента [14];

Методики расчета напряженно-деформированного состояния компонентов плитно-свайного фундамента с окружающим грунтовым массивом

В работе [15] рассматривается методика расчета осадки сваи с учетом сжимаемости материала сваи. Представленная методика способствует определению осадки сваи от действия напряжений σ_x , σ_z , τ_z (рис. 5).

В работе [16] осадка сваи состоит из следующих составляющих (рис.6):

$$\Delta s_c = \Delta_p + \Delta_G + \Delta_{f,отр} - \Delta_f \quad (22)$$

где Δ_p – деформации за счет деформирования ствола сваи от действия внешних сил;
 Δ_G – деформации за счет деформирования ствола сваи от действия собственного веса сваи;
 $\Delta_{f,отр}$ – дополнительная осадка в результате возникновения отрицательных сил трения;
 Δ_f – отрицательная осадка в результате действия сил трения.

В работе [17] были получены следующие формулы для определения дополнительных осадок:

- деформация за счет сжатия ствола сваи S_p :

$$S_p = \frac{l(2N_{03} - N_f)}{2EA} \quad (23)$$

где l – продольный размер сваи;

E – коэффициент пропорциональности между нормальным напряжением и соответствующей ему относительной продольной упругомгновенной деформацией сваи;
 A – площадь сваи, образованная пересечением продолговатого тела с воображаемой плоскостью, расположенных перпендикулярно друг другу;

N_f – максимальная нагрузка, воспринимаемая свайей за счет трения грунта по боковой поверхности.

N_{03} – величина приложенной нагрузки;

- за счет сжатия под нижним концом сваи S_l :

$$S_l = \frac{(1 - \mu^2)\omega dP}{E_0 A} \quad (24)$$

где E_0 – приращение механического напряжения, вызывающее единичное приращение относительной деформации грунта соответствующего вида под основанием сваи;

μ – упругая константа, величина отношения относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению;

d – размер сваи, образованная пересечением продолговатого тела с воображаемой плоскостью, расположенных перпендикулярно друг другу;

ω – коэффициент формы, принимаемый для круглого сечения равным единице.

P – величина нагрузки под пятой сваи.

Общая осадка сваи:

$$S = \frac{l(2N_{03} - N_f)}{2EA} + \frac{(1 - \mu^2)\omega dP}{E_0 A} + S_g \quad (25)$$

В работе. [18] способ определения напряженно-деформированного состояния учитывает эффект «обжатия», тогда несущая способность основания выражается формулой:

$$F_{d.г.с} = F_{d \text{ исп}} * \frac{F'_{d.г.с}}{F'_{d.o.c}} \quad (26)$$

где $F_{d.г.с}$ – максимальная нагрузка, воспринимаемая основанием сваи в составе в составе свайного поля;

$F_{d \text{ исп}}$ – максимальная нагрузка, воспринимаемая основанием сваи, по данным полевых испытаний;

$F'_{d.г.с} = (R + \Delta R) * A + u \sum (f_i + \Delta f_i) h_i$ и $F'_{d.o.c} = R * A + u \sum f_i h_i$ – максимальная нагрузка, воспринимаемая свайей в составе группы свай и одиночной сваи.

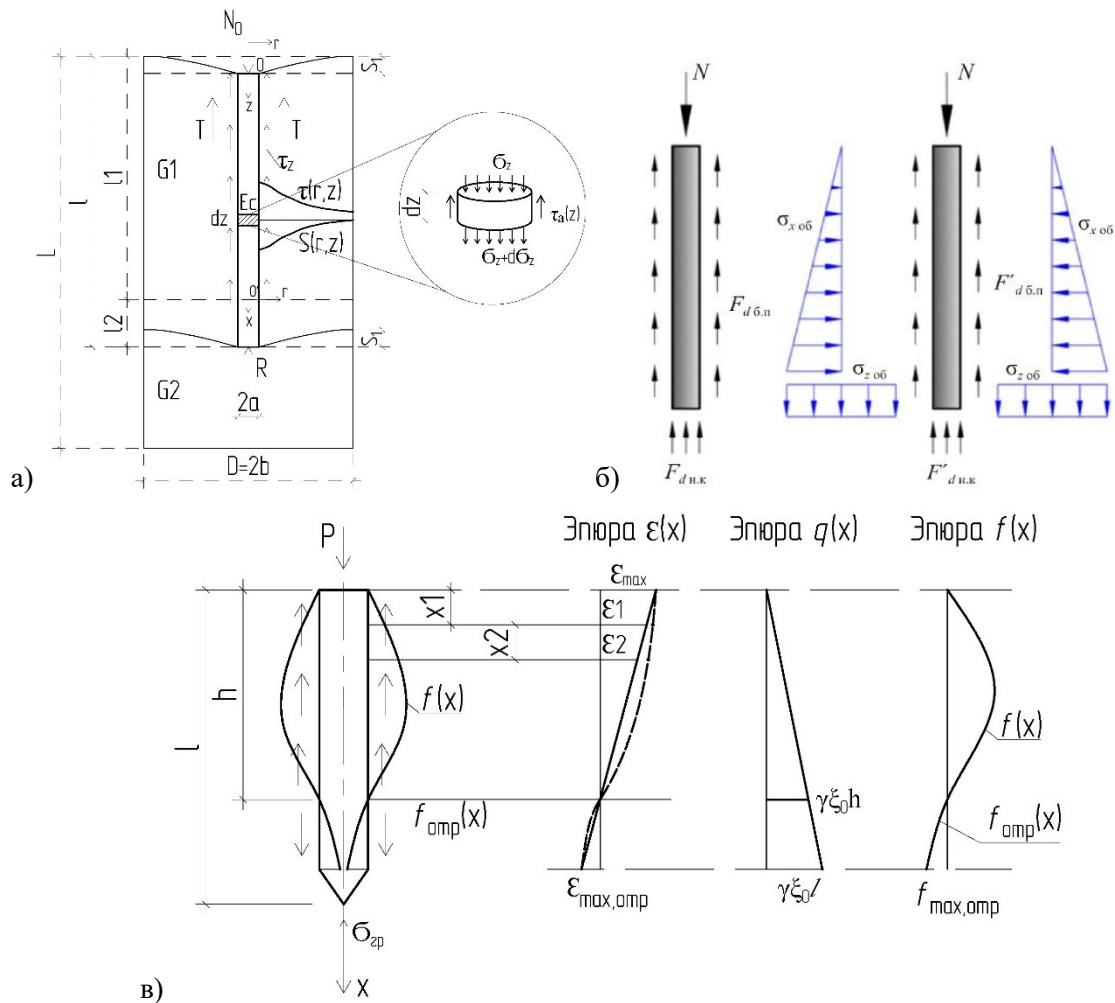


Рис. 3. а) Расчетная схема взаимодействия сжимаемой сваи с двухслойным массивом грунта [15]; б) Расчетная схема для определения предельного сопротивления одиночной сваи и сваи в составе группы свай [17]; в) Расчетная схема работы сваи в однородном грунте основания [16];

3. Результаты

В результате рассмотрения различных методик расчета напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента были найдены формулы позволяющие определить несущую способность и осадку плитно-свайного фундамента в результате нагружения статическими и циклическими нагрузками.

Так осадку плитно-свайного фундамента при действии кратковременных статических нагрузок можно определить, рассматривая деформации линейно-деформируемого основания и дополнительные осадки, зависящие от шага свай, от деформаций ствола сваи и от действия внешней нагрузки по формуле (27), рассматривая взаимное влияние и распределение нагрузок между плитой и сваями (28), а так же с учетом возникающих усилий трения, напряжений под ростверком и по нижним концом свай.

$$s = s_{ef} + \Delta s_p + \Delta s_c \quad (27)$$

$$S_{\text{п.с}} = S_{\text{св}} + S_{\text{пл}} \quad (28)$$

$$S_c = S_1(T) = S_2(P) = S_3(R) \quad (29)$$

Осадку плитно-свайного фундамента при действии циклической нагрузки можно определить из формулы (30) с учетом особенностей достижения предела выносливости в каком-то из элементов системы «плитно-свайный фундамент – грунтовый массив», с учетом проявления деформаций виброползучести грунта и бетона сваи в стесненных условиях.

$$S(N) = S_{ef}(N) + \Delta s_p(N) + \Delta s_c(N) \quad (30)$$

Несущая способность плитно-свайного фундамента под действием циклических нагрузок определяется исходя из учета снижения усталостной прочности и увеличения деформаций циклической ползучести грунтового основания по условию ограничения развития в нем вертикальных деформаций и оценивается из условий:

$$P_{2,i}(N) \leq \sigma_{1u}(N) \quad (31)$$

$$P_{3,i}(N) \leq \sigma_{1u}(N) \quad (32)$$

Также представлена методика, позволяющая определить несущую способность плитно-свайного фундамента за счет установления ее максимально допустимой осадки:

$$P_{пл} = \frac{d_1 + \sqrt{d_1^2 + \frac{4 * S_{пл} * E}{k * \gamma * \beta}}}{2} k * \gamma \quad (33)$$

Методики расчета напряженно-деформированного состояния отдельных элементов входящий в состав ПСФ в результате действия статических нагрузок с учетом того что с возрастанием величины нагрузки происходит осадка сваи за счет деформации окружающего грунта S_g , по мере увеличения нагрузки возникает дополнительная осадка за счет сжатия ствола сваи S_p и за счет сжатия под нижним концом сваи S_l и общая осадка выражается формулой (34).

$$S = S_p + S_l + S_g \quad (34)$$

Так же определение осадки за счет сжатия ствола сваи с учетом действия сил трения и возникающего отрицательного трения по формуле (35):

$$\Delta S_c = \Delta_p + \Delta_G + \Delta_{f,отр} - \Delta_f \quad (35)$$

4. Обсуждение

Рассмотренные методики расчета напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента и отдельных элементов, входящих в состав ПСФ при статических и циклических нагрузках, показывают, что при расчетах рассматривалась система «фундамент – грунтовое основание». Под действием статических и циклических нагрузок были получены методики расчета рассматривающие взаимное влияние компонентов свайного поля между собой в грунтовом пространстве, влияние сопротивления, возникающего по боковой поверхности сваи и отпора грунта под подошвой сваи на значение деформации сваи, зависимости разделения нагрузки приходящиеся на ПСФ между плитным ростверком и свайным полем, развитие деформации грунтового основания и ствола сваи по мере ее нагружения вертикальной нагрузкой.

5. Заключение

На основании анализа выполненных методик расчета напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента, можно сделать следующие выводы:

1. Основное количество методик расчета напряженно-деформированного состояния ПСФ разработаны для статического нагружения с таким учетом, что данные нагружения неизменны на протяжении всего жизненного цикла здания или сооружения.
2. Существующие методики расчета плитно-свайного фундамента не могут учитывать напряженно-деформированное состояние, возникающее сваях, плитах, в грунте межсвайного пространства и окружающего массива грунта в результате совместной работы системы «плитный ростверк – свая – грунт межсвайного пространства – грунт ниже острия сваи» в результате режимного циклического нагружения.
3. В связи с вышеизложенным назрела необходимость в разработке методики расчета несущей способности и осадки плитно-свайного фундамента с учетом изменения напряженно-деформированного состояния при режимных циклических нагружениях.

Список литературы

1. Katzenbach R., Leppla S. Environment-friendly and economically optimized foundation systems for sustainable high-rise buildings: ICSMGE 2017 – 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering / 19th ICSMGE Secretariat. Seoul, 2017. P. 3381–3384.
2. Katzenbach R., Leppla S. Optimised design of foundation systems for high-rise structures: Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation - Proceedings of the 6th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and

Computation / CRC Press, Balkema. Cape Town, 2016. P. 2042–2047. DOI: 10.1201/9781315641645-338.

3. Bokov I. A., Fedorovskii V. G. On the Calculation of Groups of Piles Using Mutual Influence Coefficients in the Elastic Half-Space Model // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2018. V. 54. Iss. 6. P. 363–370. DOI: 10.1007/s11204-018-9482-8.

4. Bokov I. A., Fedorovskii V. G. On the Applicability of the Influence Function Obtained from Single-Pile Calculations for the Calculation of Pile Groups // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2019. V. 55. Iss. 6. P. 359–365. DOI: 10.1007/s11204-019-09549-y.

5. Mirsayapov, I., Khorkov, E., Minzianov. R. Research of the stress-strain state of a reinforced concrete beamless floor. // 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE – 2021); E3S Web Conf. V. 274. DOI: 10.1051/e3sconf/202127403031.

6. Mirsayapov, I., Minzianov. R. Rebar movement in seals under static loading // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 890, International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2020) 29 April - 15 May 2020, Kazan, Russian Federation. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012073.

7. Mirsayapov I. T., Shakirov M. I. Deformation features of raft-pile foundations models under the action of cyclic loading // Socio-Technical Construction and Civil Engineering: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (2021) 420043 Kazan, Russia/ – P. 1-9.

8. Мирсаяпов И. Т., Шакиров М. И. Несущая способность и осадки моделей плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении: сб. ст. Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании – Международной научной конференции / МГСУ. М. 2012. С. 528–531.

9. Мирсаяпов И. Т., Шакиров М. И. Исследование влияния циклической нагрузки на модели комбинированного плитно-свайного фундамента: сб. ст. Строительство – формирование среды жизнедеятельности – XVII Международной научной конференции / МГСУ. М., 2014. С. 423–429.

10. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Combined Plate-Pile Foundations Settlement Calculation under Cyclic Loading // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 890. № 012069. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012069.

11. Фадеев А.Б., Мангушев Р.А. Расчет плитно-свайного фундамента // Вестник гражданских инженеров. 2007. №2. – С. 64-67.

12. Тер-Мартirosян З. Г., Чинь Т. В. Взаимодействие свай большой длины с массивом грунта в составе плитно-свайного фундамента // Вестник МГСУ. 2012. – Т. 7, Вып.3. – С. 74-78.

13. Самородов А. В. Новая конструкция плитно-свайного фундамента. // Вестник Приднестровской государственной академии строительства и архитектуры. 2016. Вып.1 - С. 61-68.

14. Мирсаяпов И. Т., Артемьев Д. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента при совместном деформировании с окружающим грунтовым массивом Вестник гражданских инженеров. 2009. №2. – С. 121-123.

15. Тер-Мартirosян З. Г., Чинь Туан Вьет. Взаимодействие одиночной длинной сваи двухслойным основанием с учетом сжимаемости ствола сваи // Вестник МГСУ. 2012. – Т. 7, Вып.4, - С. 28-34.

16. Уткин В. С., Сушев Л. А., Соловьев С. А. Совершенствование методов расчета свайных фундаментов по осадке // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 3. С. 331–339. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.331-339

17. Готман А. Л., Гавриков М. Д. Исследование особенностей работы вертикально нагруженных длинномерных буронабивных свай и их расчет // Construction and Geotechnics. – 2021. – Т. 12, № 3. – С. 72–83. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.08

18. Готман Н. З., Алехин В. С., Сергеев Ф. В. Определение предельного сопротивления основания сваи в составе группы свай // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 13–21. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.02

References

1. Katzenbach R., Leppla S. Environment-friendly and economically optimized foundation systems for sustainable high-rise buildings: ICSMGE 2017 – 19th International

Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering / 19th ICSMGE Secretariat. Seoul, 2017. P. 3381–3384.

2. Katzenbach R., Leppla S. Optimised design of foundation systems for high-rise structures: Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation - Proceedings of the 6th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation / CRC Press, Balkema. Cape Town, 2016. P. 2042–2047. DOI: 10.1201/9781315641645-338.

3. Bokov I. A., Fedorovskii V. G. On the Calculation of Groups of Piles Using Mutual Influence Coefficients in the Elastic Half-Space Model // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2018. V. 54. Iss. 6. P. 363–370. DOI: 10.1007/s11204-018-9482-8.

4. Bokov I. A., Fedorovskii V. G. On the Applicability of the Influence Function Obtained from Single-Pile Calculations for the Calculation of Pile Groups // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2019. V. 55. Iss. 6. P. 359–365. DOI: 10.1007/s11204-019-09549-y.

5. Mirsayapov, I., Khorkov, E., Minzianov. R. Research of the stress-strain state of a reinforced concrete beamless floor. // 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE – 2021); E3S Web Conf. V. 274. DOI: 10.1051/e3sconf/202127403031.

6. Ishat Mirsayapov and Rustam Minzianov. Rebar movement in seals under static loading // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 890, International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2020) 29 April - 15 May 2020, Kazan, Russian Federation. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012073.

7. Mirsayapov I. T., Shakirov M. I. Deformation features of raft-pile foundations models under the action of cyclic loading // Socio-Technical Construction and Civil Engineering: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (2021) 420043 Kazan, Russia/ – P. 1-9.

8. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Bearing capacity and settlements of models of slab-pile foundations under cyclic loading: Sat. Art. Integration, partnership and innovation in building science and education - International Scientific Conference / MGSU. M. 2012. P. 528–531.

9. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Study of the influence of cyclic load on the model of a combined slab-pile foundation: Sat. Art. Construction - the formation of the environment of life - XVII International Scientific Conference / MGSU. Moscow, 2014, P. 423–429.

10. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Combined Plate-Pile Foundations Settlement Calculation under Cyclic Loading // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 890. № 012069. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012069.

11. Fadeev A.B., Mangushev R.A. Calculation of slab-pile foundation // Bulletin of civil engineers. 2007. №. 2. – P. 64-67.

12. Ter-Martirosyan Z. G., Chin T. V. Interaction of piles of great length with a mass of soil as part of a slab-pile foundation // Vestnik MGSU. 2012. - Vol. 7, Iss. 3. - P. 74-78.

13. Samorodov A. V. New design of slab-pile foundation. // Bulletin of the Pridneprovsk State Academy of Construction and Architecture. 2016. Iss. 1 - P. 61-68.

14. Mirsayapov I. T., Artemiev D. A. Simulation of the stress-strain state of a slab-pile foundation during joint deformation with the surrounding soil mass Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2009. №. 2. – P. 121-123.

15. Ter-Martirosyan Z. G., Chin T. V. Interaction of a single long pile with a two-layer base, taking into account the compressibility of the pile shaft. Vestnik MGSU. 2012. - Vol. 7, Iss 4, - P. 28-34.

16. Utkin V. S., Sushev L. A., Soloviev S. A. Improving methods for calculating pile foundations by settlement. Vestnik MGSU. 2021. Vol. 16. Iss. 3. P. 331–339. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.331-339

17. Gotman N. Z., Alekhin V. S., Sergeev F. V. Determination of bearing capacity of piles in the group. Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture. 2017. Vol. 8, no. 3. Pp. 13-21. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.02

18. Gotman A. L., Gavrikov M. D. Calculation of a large-size bored pile on a vertical load. Construction and Geotechnics. 2021. Vol. 12. No. 3. Pp. 72-83. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.08

Информация об авторах

Илизар Талгатович Мирсаяпов, доктор технических наук, профессор Института архитектуры и дизайна КГАСУ, г.Казань, Российская Федерация.

Email: mirsayapov1@mail.ru

Алмаз Ильгамович Гараев аспирант Института архитектуры и дизайна КГАСУ, г.Казань, Российская Федерация.

Email: almaz.garaev1997@mail.ru

Information about the authors.

Ilizar T.Mirsayapov doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineerin, Kazan, Russian Federation

Email: mirsayapov1@mail.ru

Almaz I.Garaev postgraduate student, Kazan State University of Architecture and Engineerin, Kazan, Russian Federation

Email: almaz.garaev1997@mail.ru

DOI: 10.52409/20731523_2022_1_19
УДК 624.154.001.8

Деформации грунтовых оснований плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении

М.И. Шакиров¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: в современных условиях при строительстве зданий и сооружений одной из наиболее важных задач при проектировании зданий и сооружений, в процессе эксплуатации, которых необходимо учитывать влияние циклических нагрузок, является прогноз осадок оснований плитно-свайных фундаментов с учетом изменения прочностных и деформационных характеристик. Целью исследования является - на основании экспериментальных исследований установить закономерности развития деформаций оснований плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении.

В статье установлены основные закономерности изменения деформаций грунтовых оснований плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении, являющиеся экспериментальной базой для создания новых методов расчета оснований плитно-свайных фундаментов.

Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в том, что они позволяют более точно и достоверно оценивать осадку плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении, повысить эксплуатационную надежность, экономичность и разработать адекватные проектные решения таких фундаментов.

Ключевые слова: плитно-свайный фундамент, деформации, усилия, циклическое нагружение, основание фундамента, грунтовый массив.

Для цитирования: М.И. Шакиров. Деформации грунтовых оснований плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении//Известия КГАСУ 2022 № 1(59). С19-28.
DOI: 10.52409/20731523_2022_1_19

Raft-pile foundation ground base deformation under cyclic loading

M.I. Shakirov¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract: Problem statement. In modern conditions, in the construction of buildings and structures, one of the most important tasks in the design of buildings and structures, which require taking into account the influence of cyclic loads during their exploitation, is the forecast of raft-pile foundations ground base settlement, taking into account changes in strength and deformation characteristics. The purpose of the study is to establish the raft-pile foundations ground base deformation development patterns under cyclic loading on the basis of experimental research.

Results. The main change patterns in deformations of raft-pile foundations ground base under cyclic loading are established, which serve as an experimental basis for creating new Methods for calculating raft-pile foundation ground base.

Conclusions. The significance of the obtained results for the construction industry lies in the fact that they allow more accurate and reliable evaluating of the settlement of raft-pile foundations under cyclic loading, increasing operational reliability and efficiency and developing adequate design solutions for such foundations.

Keywords: raft-pile foundation, deformations, forces, cyclic loading, foundation ground base, soil mass.

For citation: M. Shakirov, Raft-pile foundation ground base deformation under cyclic loading//News KSUAE 2022 №1 (59). C19-28. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_19

1. Введение

В условиях плотной городской застройки, возведение зданий повышенной этажности приводит к увеличению нагрузок на основания фундаментов. При этом одним из наиболее эффективных способов увеличения несущей способности и уменьшения осадки основания зданий и сооружений является применение комбинированных плитно-свайных фундаментов [1-5]. В то же время данный вид фундаментов помимо статических нагрузок испытывают также и циклические воздействия [6-9].

В связи с этим, возникает необходимость исследования напряженно-деформированного состояния свайного основания комбинированных плитно-свайных фундаментов учитывающие совместную работу элементов фундамента и грунтового основания в процессе циклического нагружения.

При этом практически не исследован вопрос влияния циклических нагружений на плитно-свайные фундаменты, возникающих в процессе строительства и эксплуатации зданий и сооружений [10-11].

Целью исследования является - на основании экспериментальных исследований установить закономерности развития деформаций оснований плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении.

Задачами работы являются:

- выполнение экспериментальных исследований поведения плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении;
- установление закономерностей развития деформаций грунта межсвайного пространства и усилий в сваях плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении;
- установление закономерностей развития вертикальных деформаций (осадок) оснований плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении.

2. Материалы и методы

Экспериментальные исследования плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении были проведены в лабораторных условиях. Поэтапный принцип проведения экспериментов и анализ результатов позволил системно объединить все исследования для обработки результатов проведенных исследований.

По результатам экспериментальных исследований получены графические и аналитические зависимости изменения прочностных и деформационных характеристик грунтового основания и элементов плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении.

Для исследования особенностей работы комбинированного плитно-свайного фундамента в грунте, была разработана методика проведения испытаний и создана модель плитно-свайного фундамента.

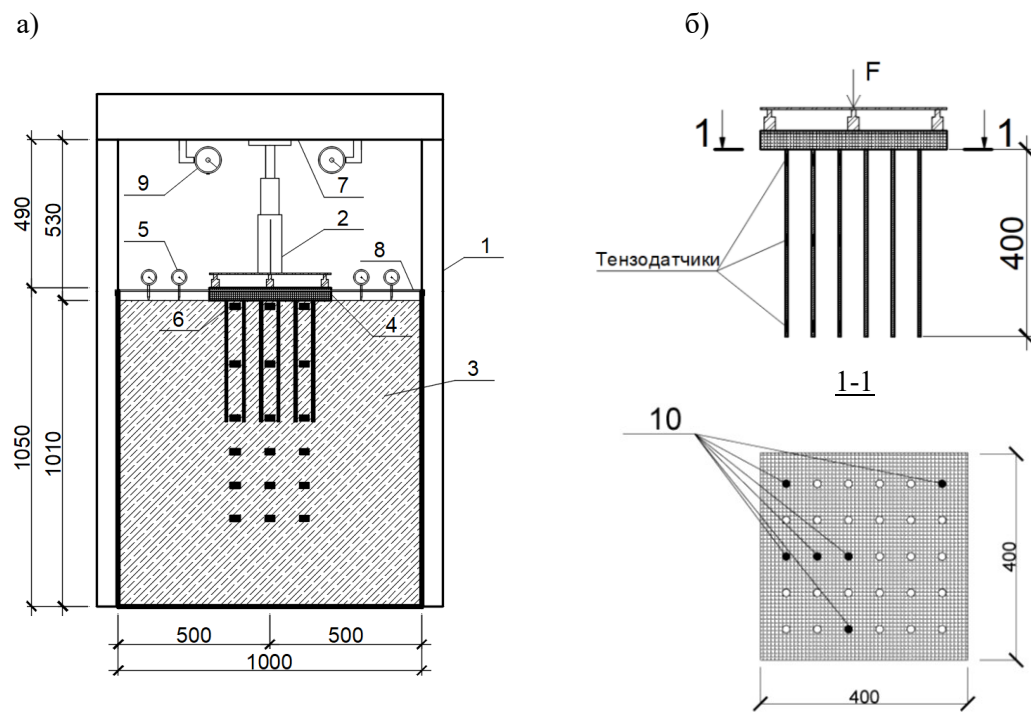


Рис.1. Схема испытания в лабораторных условиях (иллюстрации автора):

а) схема расположения грунтовых датчиков; б) схема расположения тензодатчиков по длине свай

1 – объемный лоток; 2 – загрузочное устройство; 3 – грунт основания; 4 – плитно-свайный фундамент; 5 – индикаторы часового типа; 6 – датчики давления в грунте; 7 – упорная конструкция нагружающего устройства; 8 – траверса индикаторов часового типа;

9 – прогибомеры; 10 – сваи с датчиками

Лабораторное исследование заключалось в испытании шести моделей плитно-свайного фундамента, каждый из которых состоял из плиты ростверка и свай, жестко защемленных в ростверк и испытании одиночных свай. Испытания проводились на действие циклических нагрузок для установления несущей способности фундамента, зависимости вертикальных перемещений в грунте от нагрузки, определения деформаций и напряжений, возникающих в сваях, межсвайном массиве грунта и в грунте ниже условного фундамента.

Были проведены испытания плитно-свайного фундамента на действие статической и циклической нагрузки, выполненного из свай, представляющие собой полые пластиковые трубки, диаметром 7 мм с длиной 40 см и толщиной стенки 1 мм. Ростверк представлял собой железобетонную плиту с размерами в плане 40х40 см. и толщиной 4 см, армированную двумя арматурными сетками из проволоочной арматуры В500 Ø3 мм. Грунтом основания являлась пластичная супесь (модуль деформации $E=7$ МПа, угол внутреннего трения $\varphi=20^\circ$, удельное сцепление $c=4,5$ кПа, плотность $1,5$ т/м³).

Таблица 1

Режимы испытания модели при циклическом нагружении

№	Фундамент	Вид нагрузки	Длина свай, см	Нагрузка, кг		Кол-во циклов нагружения, N
				P _{max}	P _{min}	
1.	Плитно-свайный (ПСФ) образец №1	статическая	40	1100	-	-
2.	ПСФ 2	циклическая	40	1000	500	15
3.	ПСФ 3	циклическая	40	600	300	200
4.	ПСФ 4	циклическая	40	500	250	500
5.	ПСФ 5	циклическая	40	400	200	1500
6.	ПСФ 6	циклическая	40	350	175	2500
7.	ПСФ, полевые испытания	циклическая	200	25000	12500	3000

Сначала проводилось статическое испытание модели плитно-свайного фундамента с целью определения предельной несущей способности основания при заданной предельной величине осадки равной $[S_u] = 80\text{ мм}$, характера развития осадки, деформаций и усилий в сваях и грунтах межсвайного пространства и ниже острия свай. Полученное значение предельной несущей способности основания учитывалось при назначении максимальной нагрузки цикла при циклическом нагружении.

Усилия в сваях определялись с помощью наклеенных по длине тензорезисторов на высоте 20, 200 и 370 мм от оголовка свай.

3. Результаты и обсуждение

На основании проведенного эксперимента, при поэтапном нагружении кратковременной статической нагрузкой получено значение предельной несущей способности, равной $P_{ст} = 1100 \text{ кг} \cdot \text{с}$.

В результате испытаний установлено, что статическое нагружение приводит к увеличению усилий в сваях. Характер изменения усилий в сваях показывает перераспределение усилий из свай в грунты межсвайного пространства. Также установлено, что происходит увеличение напряжений в грунте во всех зонах грунта по мере увеличения нагружения. При этом необходимо отметить, что наибольшее увеличение напряжений происходит под плитным ростверком.

Опытным путем установлено, что по мере увеличения нагрузок интенсивность нарастания осадок существенно уменьшалась, но полной их стабилизации не наблюдается. Такая закономерность развития осадок объясняется тем, что в общем случае изменение осадок зависит от развития деформаций грунта межсвайного пространства под ростверком, деформаций сдвига между грунтом и сваями и деформаций грунта в зоне под нижним концом свай.

В начальной стадии реализуются деформации уплотнения практически во всех зонах. Приращение деформаций уплотнения после нагружения практически прекращались, что вызвало уменьшение интенсивности нарастания осадок.

Осадки основания, измеренные в процессе ступенчатых статических нагружений, изменяются аналогично деформациям грунта межсвайного пространства.

Результаты экспериментальных исследований моделей плитно-свайных фундаментов при действии циклических нагрузок показывают, что по мере увеличения количества циклов нагружения, не зависимо от величины максимальной нагрузки цикла, происходит снижение несущей способности основания. В таблице 2 приведены результаты

исследования моделей плитно-свайных фундаментов, которые наглядно показывают снижение несущей способности при циклическом нагружении.

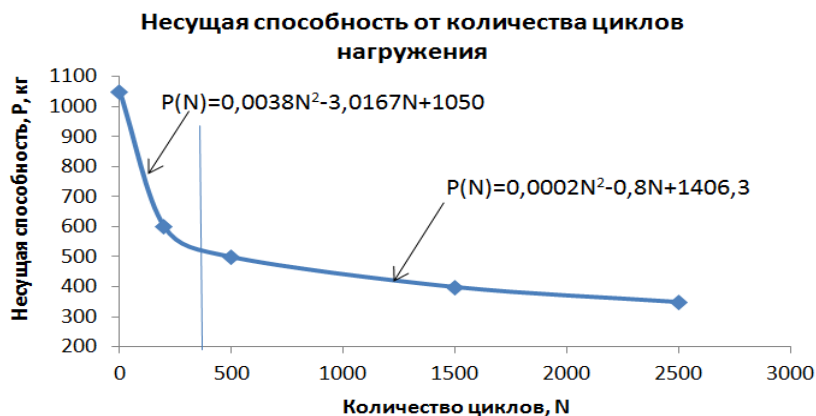
Таблица 2

Результаты испытания моделей плитно-свайных фундаментов

№ п/п	Шифр модели	$P_{\max}$, кг	$P_{\min}$, кг	$\rho = \frac{F_{\min}}{F_{\max}}$	Количество циклов до достижения предельной несущей способности
1	ПСФ-2	1000	550	0,5	15
2	ПСФ-3	600	300	0,5	200
3	ПСФ-4	500	250	0,5	500
4	ПСФ-5	400	200	0,5	1500
5	ПСФ-6	350	175	0,5	2500

Как видно из таблицы 2 снижение несущей способности по сравнению с однократным кратковременным статическим нагружением составляет 3,14 раза.

а)



б)

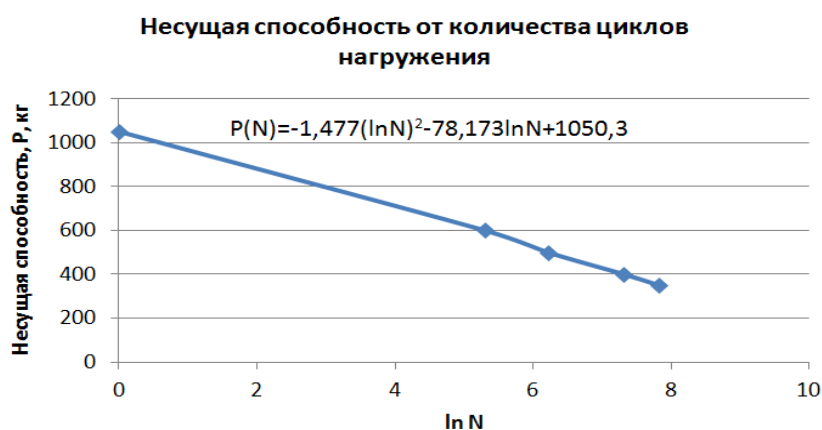


Рис.2. Изменение несущей способности моделей плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении (иллюстрации автора):

а) в координатах $P_{\max}-N$; б) в координатах $P_{\max}-\ln N$

На рисунке 2 показаны уравнения регрессии снижения несущей способности плитно-свайного фундамента в координатах $P_{max}-N$ и $P_{max}-\ln N$. Приведенные графики наглядно показывают закономерности снижения несущей способности моделей плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении по мере увеличения количества циклов нагружения. Видно, что наиболее интенсивное снижение несущей способности происходит при больших значениях максимальной нагрузки цикла P_{max} , составляющих (0,55-0,91) от предельной несущей способности при однократном кратковременном статическом нагружении.

Циклические нагружения вызвали увеличения осадок основания как в пределах плитного ростверка, так и за его пределами, причем интенсивность их развития зависела от координаты рассматриваемой точки. Интенсивное развитие осадок происходило в начальной стадии нагружения в течении первых (1...5) циклов повторных нагружений в зависимости от величины максимальной нагрузки цикла циклического нагружения.

После 5...15 циклов повторного нагружения интенсивность нарастания осадок существенно уменьшалась, но полной их стабилизации не наблюдается. Такая закономерность развития осадок объясняется тем, что в общем случае изменение осадок зависит от развития деформаций грунта межсвайного пространства под ростверком, деформаций сдвига между грунтом и сваями и деформаций грунта в зоне под нижним концом свай.

В начальной стадии реализуются деформации уплотнения практически во всех зонах. Приращение деформаций уплотнения после 5 цикла нагружений практически прекращался, что вызвало уменьшение интенсивности нарастания осадок. Осадки основания, измеренные в процессе ступенчатых циклических нагружений после различного количества повторной нагрузки, изменяются аналогично деформациям грунта межсвайного пространства. Происходит качественное превращение диаграммы $P-S$, т.е. переход криволинейной диаграммы в прямолинейную, что свидетельствует о переходе деформирования грунта в линейную стадию.

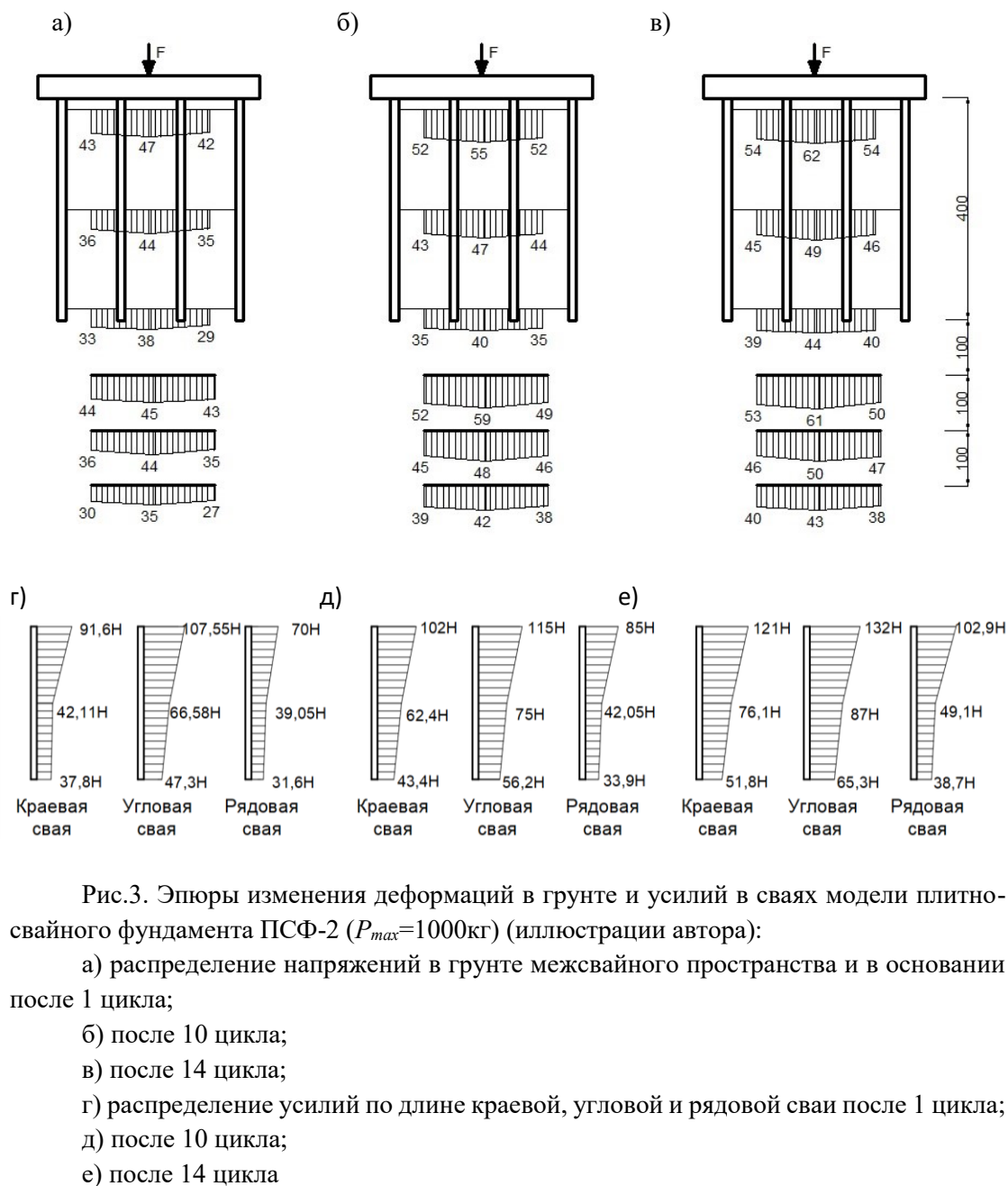
Анализ изменения осадок оснований после различного количества циклов показывает, что приращение осадок происходит, в основном, за счет увеличения их остаточной части.

Величина же осадки в течении одного цикла меняется незначительно. При испытаниях зафиксированы изменения этих («упругих») осадок по мере увеличения количества циклов нагружений. В течении первых 20 циклов эти осадки несколько уменьшаются. Снижение «упругих» осадок можно объяснить уплотнением за счет уменьшения объема пор грунта, которое по интенсивности опережает уменьшения модуля сдвига деформаций сдвига между сваями и окружающим грунтом. Поскольку интенсивное уплотнение грунта происходит в начальный период повторных нагружений, а изменение сцепления между грунтом и сваями является более длительным процессом, то уже после 20 циклов нагружений «упругие» осадки оснований начинают увеличиваться. В случае если не достигается предельное состояние основания, к моменту 1200 циклов нагружения наступает относительная стабилизация, т.е. зависимость $P-S_{уп}$ становится близкой к линейной. Причины, вызывающие изменение «упругих» и остаточных осадок, вероятно, различны.

«Упругая» часть осадки связана с уплотнением грунта в начальной стадии, разрушением структурных связей между твердыми частицами грунта и уменьшением модуля сцепления между сваями и окружающим грунтом, упругой разгрузкой свай при уменьшении нагрузки, а остаточная часть – с неупругими деформациями грунта под плитным ростверком вследствие циклической ползучести и развития микротрещин усталости в пластически деформированных локальных зонах.

В условиях циклического нагружения, по мере увеличения количества циклов происходит увеличение деформаций в грунте межсвайного пространства и в грунте ниже острия свай по сравнению с первым циклом нагружения. При этом происходит развитие усилий в сваях с увеличением количества циклов и наибольшие усилия возникают в угловых и рядовых сваях, а наименьшие в центральных. Графики развития деформаций в грунте межсвайного пространства показывают, что наибольшие деформации возникают непосредственно под плитой ростверка, а наименьшие в зоне на уровне нижнего конца свай.

Изменение усилий в сваях, расположенных в характерных зонах плитно-свайного фундамента, приведены на рисунке 3. Как видно из рисунков циклическое нагружение приводит к увеличению усилий в сваях. Характер изменения усилий в сваях показывает перераспределение усилий из свай в грунты межсвайного пространства.



На рисунке 4 приведены графики изменения деформаций в различных зонах грунта межсвайного пространства. Как видно из рисунков, происходит увеличение деформаций в грунте во всех зонах грунта по мере увеличения количества циклов нагружения. При этом необходимо отметить, что наибольшее увеличение деформаций происходит под плитным ростверком.

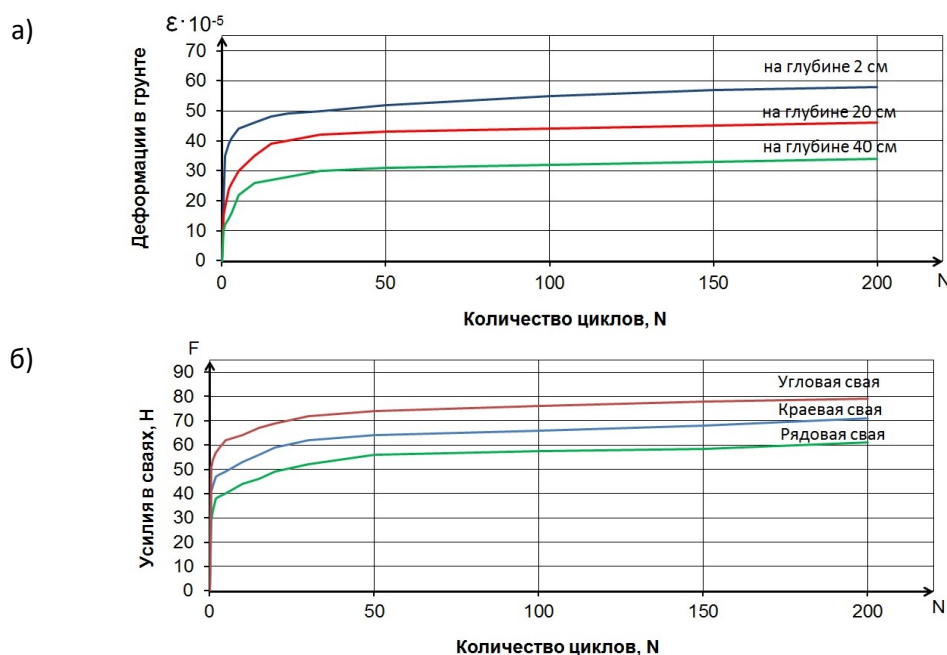


Рис. 4. Изменение деформаций в грунте межсвайного пространства (а) и усилий в сваях (б) плитно-свайного фундамента ПСФ-3 при циклическом нагружении (иллюстрации автора)

4. Заключение

Выполненные экспериментальные исследования деформаций оснований плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении позволили установить:

1. При циклическом нагружении происходит изменение напряжений и усилий в сваях на разных зонах свайного основания. Напряжения в грунте и усилия в сваях с различной интенсивностью развиваются на всем протяжении испытаний наиболее интенсивные изменения происходят на начальной стадии нагружения, примерно до 100 циклов.

2. В условиях циклического нагружения, по мере увеличения количества циклов происходит увеличение деформаций в грунте межсвайного пространства по сравнению с первым циклом нагружения, но в то же время увеличиваются деформации в грунте под нижним концом свай. При этом происходит развитие усилий в сваях с увеличением количества циклов и наибольшие усилия возникают в угловых и рядовых сваях, а наименьшие в центральных. Наибольшие деформации возникают непосредственно под плитой ростверка, а наименьшие в зоне на уровне нижнего конца свай.

3. Анализ полученных результатов проведенных экспериментальных исследований позволил установить, что уменьшаются напряжения в грунте межсвайного пространства с увеличением количества циклов, происходит перераспределение усилий между грунтом межсвайного пространства и сваями.

4. Анализ изменения осадок оснований показывает, что в основном приращение осадок происходит за счет увеличения их необратимой части и составляет до 23-220 % от первоначальной при испытании в лотках.

Список литературы

1. Katzenbach R. et al. Soil-structure-interaction of Tunnels and Superstructures During Construction and Service Time // Procedia Engineering. 2013. Volume 57. P 35–44.
2. Katzenbach R., Leppla S., Ramm H., Seip M., Kuttig H.: Design and construction of deep foundation systems and retaining structures in urban areas in difficult soil and groundwater conditions. Procedia Engineering (57), 540-548 (2013).

3. Bhaduri A., Choudhury D.: Serviceability-Based Finite-Element Approach on Analyzing Combined Pile-Raft Foundation. *International Journal of Geomechanics* 2 (20), 43-51 (2020).
4. Boudaa S., Khalfallah S., Bilotta E.: Static interaction analysis between beam and layered soil using a two-parameter elastic foundation. *International Journal of Advanced Structural Engineering* 1 (11), 21-30 (2019).
5. Мирсаяпов Илизар Т., Королева И. В. Прочность и деформируемость глинистых грунтов при режимном пространственном напряженном состоянии с учетом трещинообразования // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2016. № 1. С. 16–23.
6. Шакиров И. Ф., Гайфуллина В. А. Исследование влияния добавок на инъекционные свойства цементных растворов, применяемых при укреплении грунтов напорной цементацией : сб. ст. Технические науки – от теории к практике – XXI Международной научно-практической конференции / СПбГАСУ. СПб. 2017. С. 37–41.
7. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Bearing capacity and settlement of raft-pile foundations under cyclic loading : dig. of art. 1 st International conference on energy geotechnics / ICEGT. Kiel. Germany, 2016. P. 423–428.
8. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Behaviour of pile–plate foundations under cyclic loading : dig. of art. *Baltic Piling Days – Proceedings of the baltic piling days conference / Estonian Geotechnical Society ISSMGE*. Tallin, 2012. P. 31–34.
9. Mirsayapov, I.T., Koroleva, I.V.: Changes in physical and mechanical characteristics of soil under triaxial loading. In: CRC Press. CONFERENCE 2019, GFAC, vol.466, pp. 193-196.
10. R. Khuziakhmetov, D. Nurieva Determination of the Reasons for the Fallof Pile Driving Machine Main Technical Near the Slope of the Foundation Pit IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.890 162304. doi: 10.1088/1757-899X/890/1/012136
11. Mirsayapov, I.T., Aysin, N.N.: Influence of a deep construction pit on a technical condition of surrounding buildings. In: CRC Press. CONFERENCE 2019, GFAC, vol.466, pp 197-201.

References

1. Katzenbach R. et al. Soil-structure-interaction of Tunnels and Superstructures During Construction and Service Time // *Procedia Engineering*. 2013. Volume 57. P 35–44.
2. Katzenbach R., Leppla S., Ramm H., Seip M., Kuttig H.: Design and construction of deep foundation systems and retaining structures in urban areas in difficult soil and groundwater conditions. *Procedia Engineering* (57), 540-548 (2013).
3. Bhaduri A., Choudhury D.: Serviceability-Based Finite-Element Approach on Analyzing Combined Pile-Raft Foundation. *International Journal of Geomechanics* 2 (20), 43-51 (2020).
4. Boudaa S., Khalfallah S., Bilotta E.: Static interaction analysis between beam and layered soil using a two-parameter elastic foundation. *International Journal of Advanced Structural Engineering* 1 (11), 21-30 (2019).
5. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V. The strength and deformability of clay soils under the regime spatial stress state in view of cracking // *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov*. 2016. № 1. P. 16–23.
6. Shakirov I.F., Gayfullina V. A. Researches of the effect from additives on the cement mortars injection properties used in strengthening soil pressure cementation : dig. of art. Technical sciences – from theory to practice – XXI international scientific-practical conference / SPbGASU. SPb. 2017. P. 37–41.
7. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Bearing capacity and settlement of raft-pile foundations under cyclic loading : dig. of art. 1 st International conference on energy geotechnics / ICEGT. Kiel. Germany, 2016. P. 423–428.
8. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Behaviour of pile–plate foundations under cyclic loading : dig. of art. *Baltic Piling Days – Proceedings of the baltic piling days conference / Estonian Geotechnical Society ISSMGE*. Tallin, 2012. P. 31–34.
9. Mirsayapov, I.T., Koroleva, I.V.: Changes in physical and mechanical characteristics of soil under triaxial loading. In: CRC Press. CONFERENCE 2019, GFAC, vol.466, pp. 193-196.

10. R Khuziakhmetov, D. Nurieva Determination of the Reasons for the Fallof Pile Driving Machine Main Technical Near the Slope of the Foundation Pit IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.890 162304. doi: 10.1088/1757-899X/890/1/012136

11. Mirsayapov, I.T., Aysin, N.N.: Influence of a deep construction pit on a technical condition of surrounding buildings. In: CRC Press. CONFERENCE 2019, GFAC, vol.466, pp 197-201.

Информация об авторах

Марат Илдусович Шакиров, ассистент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
E-mail: shakirovm123@mail.ru

Information about the authors

Marat I. Shakirov, assistant, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
E-mail: shakirovm123@mail.ru



DOI: 10.52409/20731523_2022_1_29
УДК 721.011: 699.86.022.3

Оценка и регулирование конденсации водяного пара в ограждающих конструкциях.

В.Н. Куприянов¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: известно, что сопротивление паропрооницанию материальных слоев и их сочетание изменяют закономерности конденсации водяного пара в ограждающих конструкциях. В результате возникает неконтролируемая конденсация водяных паров, увлажнение материалов и снижение эксплуатационных свойств ограждающих конструкций. В связи с этим оценка и регулирование конденсации водяного пара в ограждающих конструкциях являются весьма актуальной проблемой. Цель исследования - установить влияние конструктивного решения на формирование температуры начала конденсации ограждающих конструкций и оценки продолжительности конденсации в заданном климате.

В статье установлена корреляция между долей сопротивления паропрооницанию наружного слоя в сопротивлении паропрооницанию ограждения в целом и температурой начала конденсации. Получено уравнение регрессии с достоверностью аппроксимации 0,924, которое позволяет определять температуру начала конденсации по параметрам ограждающих конструкций. Показано, что изменением параметров ограждающих конструкций можно регулировать их температуру ограждающих конструкций, а по выбранному значению температуры ограждающих конструкций проектировать ограждающие конструкции с требуемым соотношением между долей сопротивления паропрооницаемости наружного слоя и сопротивлению паропрооницанию в целом. Разработан графический метод определения календарной продолжительности конденсации водяного пара в заданном климате путем сопоставления температуры начальной конденсации ограждающих конструкций с годовым ходом температуры наружного воздуха в месте строительства. Получены инструменты для проектирования ограждающих конструкций, которые позволят снижать или исключить конденсацию водяного пара в заданном климате, что имеет большое значение для строительной отрасли.

Ключевые слова: ограждающие конструкции, сопротивление паропрооницанию, конденсация водяного пара, температура начала конденсации, продолжительность периода конденсации.

Для цитирования: В.Н. Куприянов, Оценка и регулирование конденсации водяного пара в ограждающих конструкциях//Известия КГАСУ 2022 № 1(59). С 29-40.
DOI: 10.52409/20731523_2022_1_29

Evaluation and regulation of water vapor condensation in enclosing structures.

V.N. Kupriyanov¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation.

Abstract: problem statement. It is known that the resistance to vapor permeability of material layers and their combination change the patterns of water vapor condensation in enclosing structures. The purpose of the study is to establish the features of a constructive solution for the temperature formation at the beginning of condensation of enclosing structures and to estimate

the duration of condensation in the given climate.

A correlation has been established between the proportion of resistance to vapor permeability of the outer layer in the resistance to vapor permeability of the fence as a whole and the temperature of the onset of condensation. A regression equation has been obtained with an approximation reliability of 0.924, which makes it possible to determine D by the parameters of the enclosing structures. It is shown that by changing the parameters of the enclosing structures (D shares) it is possible to regulate them, and, according to the selected value, to design the enclosing structures with the required ratio D . A graphical method has been developed for determining the calendar duration of water vapor condensation in the given climate by comparing the enclosing structures with the annual course of the outdoor air temperature at the construction site. Conclusions. Tools for the design of enclosing structures have been obtained, which will reduce or eliminate the condensation of water vapor in the given climate.

Key words: enclosing structures, vapor permeability resistance, water vapor condensation, temperature of the onset of condensation, duration of the condensation period.

For citation: V.N. Kupriyanov, Evaluation and regulation of water vapor condensation in enclosing structures//News KSUAE 2022 №1 (59).C29-40.

DOI: 10.52409/20731523_2022_1_29

1. Введение

Конденсация водяного пара в ограждающих конструкциях негативно влияет на их эксплуатационные свойства и может привести к коррозии материалов и разрушению ограждений. В зимний период перенос водяного пара через ограждающие конструкции и его конденсация усиливаются в связи с понижением температуры наружного воздуха. Изучение этого вопроса [1-3] позволило установить, что сопротивление паропрооницанию материальных слоев и их сочетание изменяют закономерности конденсации водяного пара.

Так, в ограждающей конструкции с сопротивлением паропрооницанию $R_{пк} = 21,15 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}) / \text{мг}$ конденсация водяных паров начинается при температуре наружного воздуха $t_n = -16^\circ\text{C}$, а в ограждении с $R_{пк} = 3,41 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}) / \text{мг}$ - при $t_n = 0^\circ\text{C}$ [4]. Этот пример показывает, что температура начала конденсации зависит от общего сопротивления паропрооницанию ограждающих конструкций. В соответствие с этим, будут различаться как продолжительность конденсации, так и количество конденсата, которое накопится в ограждении за зимний период. Так, в ограждении с $R_{пк} = 21,15 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}) / \text{мг}$ количество конденсата за зимний период составит $6,6 \text{ г/м}^2$, а в ограждении с $R_{пк} = 3,41 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}) / \text{мг}$ - 632 г/м^2 . Количество конденсата различается в 100 раз [5].

В работе [6] показано, что в ограждающей конструкции с $R_{пк} = 2,82 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}) / \text{мг}$ при увеличении сопротивления паропрооницанию наружных слоев $R_{пнс}$ с 0,225 до 1,786 $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}) / \text{мг}$ температура начала конденсации повысится от -7°C до $+2,5^\circ\text{C}$. Для ограждающей конструкции с $R_{пк} = 6,54 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}) / \text{мг}$ при тех же значениях $R_{пнс}$ температура начала конденсации повысится от -13°C до -2°C . Этот пример показывает влияние $R_{пнс}$ на формирование температуры начала конденсации водяного пара в ограждающих конструкциях.

В работе [7] введено понятие «температура начала конденсации водяного пара в ограждающих конструкциях $t_{нк}$ ». По определению $t_{нк}$ численно равна температуре наружного воздуха, при которой в ограждающей конструкции начинается конденсация водяного пара. Разработан метод определения [8,9,10] и показано, что каждая ограждающая конструкция имеет собственную температуру начала конденсации, которая зависит как от конструктивного решения ограждения, так и от свойств материальных слоев.

Краткий обзор позволил установить, что существующие исследования носят фрагментарный характер, поэтому в настоящей статье систематизированы существующие

исследования, на основе которых разработаны методы проектирования ограждающих конструкций с регулированием параметров конденсации в них водяного пара в заданных условиях климата.

В связи с этим, **целью работы** является установление влияния конструктивного решения на формирование температуры начала конденсации ограждающих конструкций и оценки продолжительности конденсации в заданном климате.

Для достижения указанной цели требуется решения следующих задач:

1. Определить сопротивления паропрооницанию материальных слоев и их сочетаний, которые значимо влияют на формирование температуры начала конденсации ограждающих конструкций.
2. Установить закономерности изменения продолжительности конденсации водяного пара в заданном климате по величине $t_{нк}$ ограждающих конструкций.

2. Материалы и методы

Объектами исследования являются 14 типов ограждающих конструкций с различными конструктивными решениями, различными материалами слоев и их параметрами. По методу [8,9] у всех типов ограждающих конструкций определены температуры начала конденсации $t_{нк}$.

Во введении было установлено, что $t_{нк}$ зависит как от общего сопротивления паропрооницанию $R_{пк}$, так и от сопротивления паропрооницанию наружного слоя $R_{пнс}$. Причем, с ростом $R_{пк}$ происходит снижение $t_{нк}$, а с ростом $R_{пнс}$, при неизменном $R_{пк}$, происходит повышение $t_{нк}$. Естественно предположить, что наиболее значимое влияние на формирование будет оказывать отношение сопротивления паропрооницанию наружного слоя к общему сопротивлению паропрооницания ограждающей конструкции $R_{пк}$. Это отношение можно выразить долей $R_{пнс}$ в $R_{пк}$:

$$D = (R_{пнс} / R_{пк}) \cdot 100\% \quad (1)$$

Продолжительность конденсации водяного пара в заданных климатических условиях можно определить путем сопоставления величины ограждающих конструкций с годовым ходом температуры наружного воздуха [11].

3. Результаты

Результаты расчета $R_{пк}$, $R_{пнс}$, D и $t_{нк}$ сведены в таблицу 1.

По данным таблицы 1 построен график зависимости $t_{нк}$ от D , рисунок 1. Из рисунка 1 видно, что расчетные точки с некоторыми отклонениями укладываются на усредненную кривую.

Таблица 1

Параметры исследуемых ограждающих конструкций

№	Ограждающие конструкции и наружный слой	Сопр-ие паро-нию, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$		Доля $R_{\text{пнс}}$ в $R_{\text{пк}}$, %	$t_{\text{нк}}$, °C
		огр. $R_{\text{пк}}$	нар. слоя $R_{\text{пнс}}$		
1	2	3	4	5	6
1	Основная конструкция без нар. слоя	2,77	0	0	-25
2	Основная конструкция с пленкой Изоспан А	2,79	0,016	0,6	-20
3	Основная конструкция со штукатуркой, 5 мм	3,02	0,25	8,3	-9
4	Основная конструкция со штукатуркой, 10 мм	3,27	0,5	15,3	-5
5	Основная конструкция с кирпичной кладкой, 120 мм	3,63	0,86	23,7	-3
6	Основная конструкция с кирпичной кладкой, 250 мм	4,55	1,78	39,1	0
7	Кирпичная кладка 380 мм со штукатуркой 10 мм	2,78	0,5	18,0	-1
8	Керамзитобетон 250 мм со штукатуркой 10 мм	4,45	0,5	11,2	-8
9	Железобетон 200 мм с кирпичной кладкой 120 мм	2,45	0,86	35,1	+2
10	Газобетон 250 мм с кирпичной кладкой 120 мм	8,03	0,86	10,7	-11
11	С утеплителем из экструдированного пенополистирола, керамический кирпич 120 мм и поризованная штукатурка, 8 мм	21,15	1,11	5,2	-15
12	С тонким слоем наружной штукатурки из Ceresit СТ-190, 5 мм	2,95	0,225	7,6	-10
13	С утеплителем из минваты и наружным слоем из керамического кирпича, 120 мм	4,85	1,09	22,5	-3
14	С утеплителем из монолитного пенобетона и наружным слоем из керамического эффективного кирпича, 120 мм	3,41	0,86	25,2	-4

Примечание. 1. «Основная конструкция» ограждения состоит из цем-псч. штукатурки 15 мм, кладки из силикатного кирпича 250 мм и минераловатных плит 100 мм; 2. В ограждающих конструкциях №7-10 изменен конструкционный слой; 3. Ограждающая конструкция №11 взята из СП 23-101-2004; 4. Ограждающая конструкция №14 взята из СТО 00044807-001-2006.

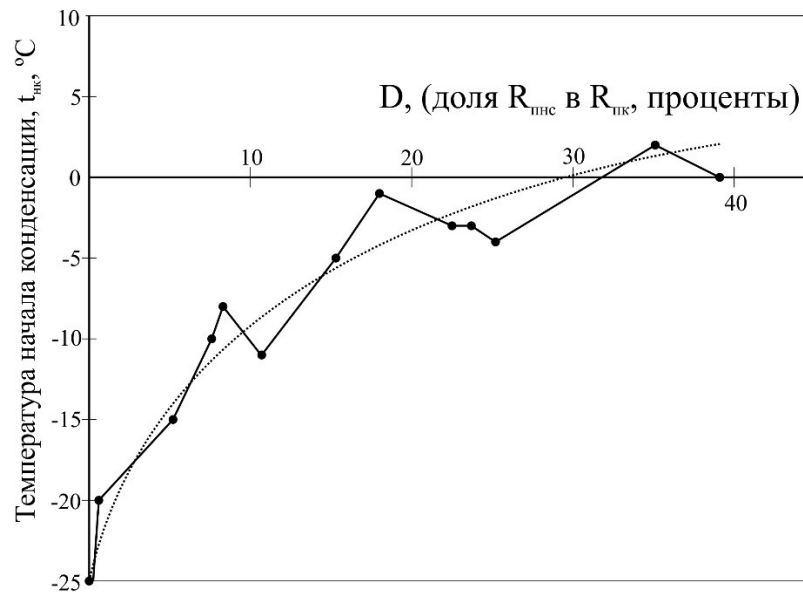


Рис. 1. Зависимость температуры начала конденсации $t_{нк}$ от доли $R_{пнс}$ в $R_{пк}$, в процентах (иллюстрация авторов)

Статистическая обработка расчетных точек позволила получить уравнение регрессии:

$$t_{нк} = -0,022 \cdot D^2 + 1,3904 \cdot D - 21,586 \quad (2)$$

Достоверность аппроксимации 0,924.

Уравнение (2) позволяет по параметрам конструктивного решения ограждения определить $t_{нк}$, то есть то значение температуры наружного воздуха t_n , при котором в данном ограждении начинается конденсация водяного пара.

Пример 1. *Определить $t_{нк}$ ограждающей конструкции, состоящей из внутренней цементно-известковой штукатурки, керамических пустотелых камней «Поротерм 51» и наружного слоя из полнотелого керамического кирпича.*

Параметры слоев:

1) - цементно-известковая штукатурка $\lambda = 0,7 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$, $\mu = 0,093 \text{ мг/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$, $\delta = 15 \text{ мм}$, 2) - «Поротерм 51», $\rho_0 = 750 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,15 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$, $\mu = 0,095 \text{ мг/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$, $\delta = 510 \text{ мм}$, 3) - керамический полнотелый кирпич $\lambda = 0,52 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$, $\mu = 0,11 \text{ мг/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$, $\delta = 120 \text{ мм}$.

Определение $t_{нк}$ по формуле (2):

$$R_{пк} = \frac{0,015}{0,093} + \frac{0,51}{0,095} + \frac{0,12}{0,11} = 0,16 + 5,37 + 1,09 = 6,62 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па) / мг}$$

$$R_{пнс} = \frac{0,12}{0,11} = 1,09 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па) / мг}$$

Доля $R_{пнс}$ в $R_{пк}$:

$$(R_{пнс} / R_{пк}) \cdot 100 = (1,09 / 6,62) \cdot 100 = 16,5\%$$

Температура начала конденсации $t_{нк}$:

$$t_{нк} = -0,022 \cdot 16,5^2 + 1,3904 \cdot 16,5 - 21,586 = -4,6^\circ\text{C}$$

Определение $t_{нк}$ по методу [8]:

$$R_{то} = 0,11 + \frac{0,015}{0,7} + \frac{0,51}{0,15} + \frac{0,12}{0,52} + 0,04 = 3,80 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C) / Вт}$$

$$R_{т,2/3} = 0,11 + 0,021 + 3,4 = 3,53 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C) / Вт}$$

$$R_{т,3/н} = 0,11 + 0,021 + 3,4 + 0,23 = 3,76 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C) / Вт}$$

$$\tau_B = 20 - \frac{20 - 4,2}{3,8} \cdot 0,11 = 19,5^\circ\text{C}, E_{\text{вп}} = 2266 \text{ Па}, e_{\text{вп}} = 0,5 \cdot 2266 = 1133 \text{ Па}$$

$$\tau_H = 20 - \frac{20 - 4,2}{3,8} \cdot 3,76 = 4,4^\circ\text{C}, E_{\text{нп}} = 836 \text{ Па}, e_{\text{нп}} = 0,76 \cdot 836 = 635 \text{ Па}.$$

$$G_K = \frac{e_{\text{вп}} - e_{\text{нп}}}{R_{\text{пк}}} = \frac{1133 - 635}{6,62} = 75,2 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$$

$$R_{\text{пв}} = \frac{e_B - e_{\text{вп}}}{G_K} = \frac{1169 - 1133}{75,2} = 0,48 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг},$$

$$R_{\text{пн}} = \frac{e_{\text{нп}} - e_H}{G_K} = \frac{635 - 627}{75,2} = 0,11 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$$

$$R_{\text{по}} = R_{\text{пв}} + R_{\text{пк}} + R_{\text{пн}} = 0,48 + 6,62 + 0,11 = 7,21 (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$$

Разность $(E - e)$ в плоскости максимального увлажнения (сечение 2/3) при трех температурах наружного воздуха:

$$t_H = +4,2^\circ\text{C}, \varphi_H = 76\%, E_B = 825 \text{ Па}, e_B = 0,76 \cdot 825 = 627 \text{ Па};$$

$$\tau_{2/3} = 20 - \frac{20 - 4,2}{3,8} \cdot 3,53 = 5,3^\circ\text{C}, E_{2/3} = 892 \text{ Па},$$

$$e_{2/3} = 1169 - \frac{1169 - 627}{7,21} \cdot 6,01 = 717 \text{ Па}.$$

$$\text{Разность давлений } (E - e) = 1169 - 717 = 175 \text{ Па}$$

$$t_H = -11,6^\circ\text{C}, \varphi_H = 80\%, E_B = 225 \text{ Па}, e_B = 0,8 \cdot 225 = 180 \text{ Па};$$

$$\tau_{2/3} = 20 - \frac{20 + 11,6}{3,8} \cdot 3,53 = -9,3^\circ\text{C}, E_{2/3} = 276 \text{ Па},$$

$$e_{2/3} = 1169 - \frac{1169 - 180}{7,21} \cdot 6,01 = 345 \text{ Па}.$$

$$\text{Разность давлений } (E - e) = 276 - 345 = -69 \text{ Па}$$

$$t_H = -21,8^\circ\text{C}, \varphi_H = 84\%, E_B = 87 \text{ Па}, e_B = 0,84 \cdot 87 = 73 \text{ Па}.$$

$$\tau_{2/3} = 20 - \frac{20 + 21,8}{3,8} \cdot 3,53 = -18,8^\circ\text{C}, E_{2/3} = 116 \text{ Па},$$

$$e_{2/3} = 1169 - \frac{1169 - 73}{7,21} \cdot 6,01 = 255 \text{ Па}.$$

$$\text{Разность давлений } (E - e) = 116 - 255 = -139 \text{ Па}$$

На рисунке 2 приведена зависимость разности давлений $(E - e)$ в плоскости максимального увлажнения от температуры наружного воздуха из которой следует, что температура начала конденсации $t_{\text{нк}} = -5^\circ\text{C}$.

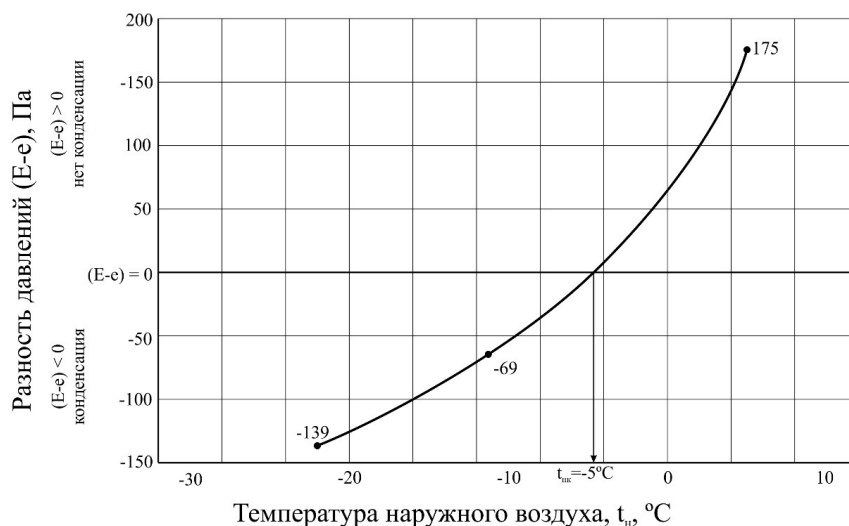


Рис. 2. Определение температуры начала конденсации, $t_{нк} = -5^\circ\text{C}$ (иллюстрация авторов)

При сравнении $t_{нк}$, определённой по формуле (2) и по графику рисунка 2 видно, что они различаются на $0,4^\circ\text{C}$. Это различие дает возможность использования формулы (2) для определения $t_{нк}$ при проектировании ограждающих конструкций.

Второй важной характеристикой процесса конденсации водяного пара являются его продолжительность в эксплуатационных условиях. Если $t_{нк}$ является характеристикой конструктивного решения ограждения, то продолжительность конденсации водяного пара зависит от $t_{нк}$, так и климатических условий места строительства.

В качестве примера на рисунке 3 приведено сопоставление $t_{нк}$ некоторых ограждающих конструкций из таблицы 1 с годовым ходом среднемесячных температур наружного воздуха в Казани (1) и в Саратове (2). Это ограждающие конструкции №11 ($t_{нк} = -15^\circ\text{C}$), №12 ($t_{нк} = -10^\circ\text{C}$) и №14 ($t_{нк} = -4^\circ\text{C}$).

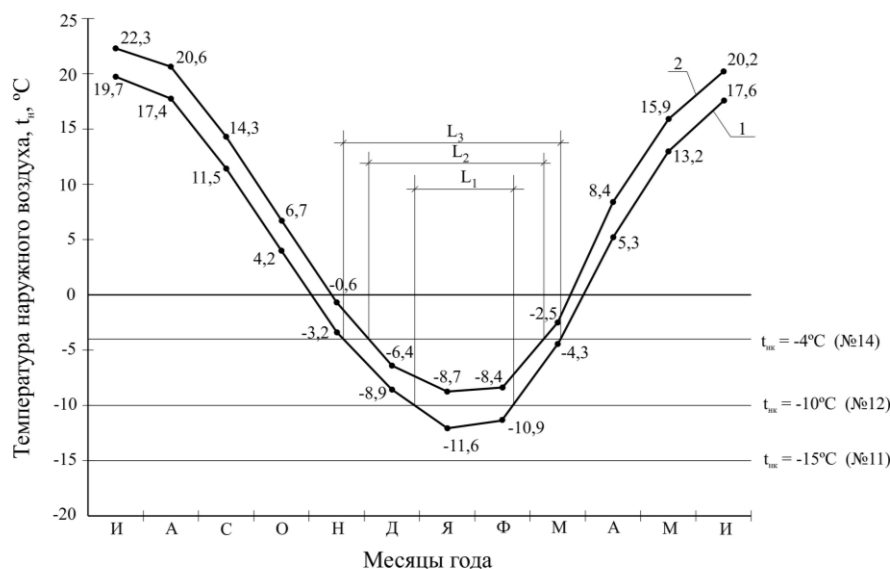


Рис. 3. К определению календарной продолжительности конденсации ограждающих конструкций в заданном климате (иллюстрация авторов)

Из рисунка 3 видно, что календарная продолжительность конденсации L определяется между точками пересечения ниспадающей и восходящей ветви температуры наружного воздуха с горизонтальными линиями $t_{нк}$ ограждающих конструкций. То есть

тем календарным периодом года, в котором температура наружного воздуха будет ниже $t_{\text{нк}}$.

Описанным методом можно определять календарную продолжительность конденсации различных ограждающих конструкций, если их использовать в одном климате и одной и той же ограждающей конструкции, если её использовать в разном климате. Так, по рисунку 3 видно, что в условиях Казани у ограждения №12, $t_{\text{нк}} = -10^{\circ}\text{C}$ продолжительность конденсации - L_1 , а у ограждения №14, $t_{\text{нк}} = -4^{\circ}\text{C}$ продолжительность конденсации - L_3 , $L_1 < L_3$, то есть чем ниже $t_{\text{нк}}$ ограждающей конструкции, тем меньше продолжительность конденсации. Ограждающая конструкция №14, $t_{\text{нк}} = -4^{\circ}\text{C}$ в условиях Казани имеет продолжительность конденсации L_3 , а в условиях Саратова - L_2 , $L_3 > L_2$. То есть, чем «суровее» климат, тем продолжительнее период конденсации в одной и той же ограждающей конструкции.

В результате проведенных исследований получены два значимых результата, которые позволяют оценивать и регулировать степень увлажнения ограждающих конструкций при конденсации в них водяного пара в заданных климатических условиях.

Первым результатом является метод определения температуры начала конденсации $t_{\text{нк}}$ по параметрам ограждающих конструкций. При расчете используется уравнение регрессии (2), полученное на основе статистической обработки параметра D у 14 типов ограждающих конструкций и их $t_{\text{нк}}$. Метод позволяет до стадии проектирования ограждающих конструкций прогнозировать их $t_{\text{нк}}$, то есть значения температуры наружного воздуха, при которой в этих ограждениях начнется конденсация водяного пара.

Вторым результатом является метод определения календарной продолжительности периода конденсации в заданных климатических условиях путем сопоставления $t_{\text{нк}}$ ограждающих конструкций с годовым ходом температуры наружного воздуха. Метод позволяет дать относительную оценку степени увлажнения ограждающих конструкций конденсированной влагой, поскольку при снижении $t_{\text{нк}}$ ограждающих конструкций снижается и продолжительность конденсации и, следовательно, степень увлажнения.

4. Обсуждение

Регрессионное уравнение (2) позволяет по параметрам конструктивного решения ограждений (параметр D) определять величину $t_{\text{нк}}$ ограждающих конструкций, то есть температуру наружного воздуха $t_{\text{н}}$, при которой в данном ограждении начинается конденсация водяного пара. Продолжительность конденсации будет определяться продолжительностью действия $t_{\text{н}}$ от их минимального значения в месте строительства до величины $t_{\text{н}} = t_{\text{нк}}$.

Продолжительность конденсации является своеобразной характеристикой эксплуатационного «благополучия» ограждающих конструкций, что определяется негативными последствиями увлажнения. Чем ниже $t_{\text{нк}}$ ограждающей конструкции, тем менее продолжительной будет конденсация в заданном климате и тем меньше накопится в ограждении конденсированной влаги.

Изменяя параметры ограждающих конструкций и материалы слоев можно регулировать $t_{\text{нк}}$, продолжительность конденсации L и, следовательно, негативные последствия увлажнения.

Определение продолжительности конденсации L по методу рисунка 3 носит ориентировочный характер. Более точную оценку (в часах) можно получить по интегральной кривой продолжительности действия характерных температур наружного воздуха от их минимальных значений в месте строительства до величины $t_{\text{н}} = t_{\text{нк}}$. В качестве примера на рисунке 4 приведена подобная интегральная кривая характерных температур для Казани, которая построена по данным [12]. В этой работе приведена продолжительность действия $t_{\text{н}}$ (в часах) по различным грациям для многих городов страны. Для данного анализа $t_{\text{н}} = t_{\text{нк}}$, по определению, поэтому на оси температур рисунка 4 приведены оба значения.

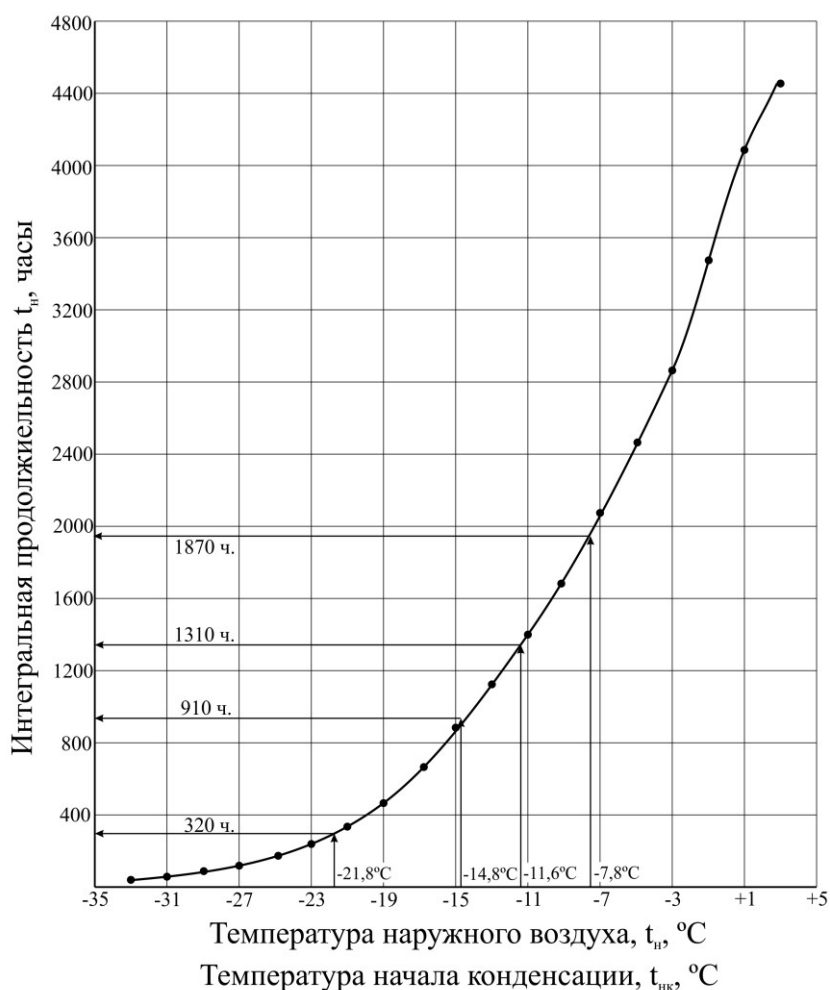


Рис. 4. Интегральная продолжительность конденсации наружного воздуха, часы (от минимального значения в месте строительства до значения t_n или $t_{нк}$ ограждающих конструкций) (иллюстрация авторов)

Из рисунка 4 следует, что с понижением $t_{нк}$ снижается продолжительность конденсации и при проектировании ограждающих конструкций возникает вопрос о выборе величины $t_n = t_{нк}$ в заданных климатических условиях, которая обеспечит минимальные негативные последствия увлажнения.

Для решения этой задачи следует провести анализ продолжительности действия характерных температур наружного воздуха, которые широко представлены в справочной литературе по климатологии [13]. Это средняя температура месяцев с отрицательными среднемесячными температурами, среднемесячные температуры наиболее холодного месяца и т.д. Полный перечень характерных температур наружного воздуха для Казани приведен в таблице 2. В столбце 3 приведены значения характерных температур, а в столбце 4 их продолжительность в часах, определенная по рисунку 4.

Таблица 2

Характерные температуры наружного воздуха в условиях Казани

№	Наименование температуры	Характеристика температуры	
		Величина, °С	Продолжительность, часы
1	Средняя температура месяцев с отрицательными среднемесячными температурами	-7,8	1870
2	Среднемесячная температура наиболее холодного месяца (января)	-11,6	1310
3	Среднемесячная температура января, сниженная на среднесуточную амплитуду	-14,8	910
4	Среднемесячная температура января, сниженная на максимальную суточную амплитуду	-21,8	320
5	Минимальная температура места строительства продолжительностью действия не менее 1 часа	-33	18

Выбор характерных температур t_n в качестве расчетных для $t_{нк}$ требует дополнительного изучения [14,15]. Можно предположить, что этот выбор должен определяться уровнем ответственности ограждающих конструкций и степенью негативного влияния увлажнения на эксплуатационные свойства ограждений. Однако, в первом приближении можно принять среднюю температуру наиболее холодного месяца, потому что при t_n выше этой температуры конденсация водяных паров в ограждении исключена, а при t_n ниже этой величины конденсация водяного пара возможных только при суточных колебаниях температуры и при отдельных волнах холода.

После обоснования расчетной величины $t_{нк}$ можно перейти к определению параметров ограждающих конструкций (параметр D), которые обеспечат заданный уровень продолжительности увлажнения. Для этой задачи можно воспользоваться уравнением регрессии вида $D = f(t_{нк})$ (обратное уравнению 2), которое получено статистической обработкой столбцов 5 и 6 таблицы 1:

$$D = 0.0548 \cdot t_{нк}^2 + 2,5168 \cdot t_{нк} + 29,009 \quad (3)$$

Достоверность аппроксимации 0,859.

Используя это уравнение можно обеспечить необходимые параметры для проектирования ограждающих конструкций, которые будут иметь заданную продолжительность конденсации.

Пример 2. Определить долю $R_{пнс}$ в $R_{пк}(D)$ проектируемого ограждения при $t_{нк}$, равной среднемесячной температуре января $t_n = -11,6^\circ\text{C}$.

$$D = 0.0548 \cdot (-11,6)^2 + 2,5168 \cdot (-11,6) + 29,009 = 0,0548 \cdot 134,56 - 2,5168 \cdot 11,6 + 29,009 = 7,2\%.$$

5. Заключение.

1. В результате проведенных исследований установлено влияние конструктивного решения ограждений на формирование в них температуры начала конденсации водяного пара и календарной продолжительности конденсации водяного пара в заданном климате;

2. Разработаны два метода расчета, которые позволяют по соотношению сопротивлений паропроницаемости материальных слоев ограждения определить температуру наружного воздуха, при которой начнется конденсация водяного пара или по параметрам климата места строительства определяется соотношение сопротивлений паропроницаемости материальных слоев ограждения, при которых снижается или исключается конденсация водяного пара в ограждении;

3. Требуется дополнительные исследования по обоснованию выбора характерных температур наружного воздуха при их использовании в качестве расчетных величин температуры начала конденсации и учету изменчивости коэффициента паропроницаемости материалов при колебаниях температурно-влажностных условий в ограждающих конструкциях.

Список литературы

1. Давидюк А.Н., Несветаев Г.В. Проектирование рациональной многослойной ограждающей конструкции по критерию защиты от влаги // Строительные материалы, 2008, №8, с. 48-50.
2. Hens H. Building physics – Heat, Air and Moisture, Ernst and Sohn, Germany, Berlin, 2007, 270 p.
3. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. Изд-е 5-е, пересмотренное. М.: Изд-во «АВОК-ПРЕСС». 2006. - 256 с.
4. Куприянов В.Н., Сафин И.Ш. Влияние конструкций наружных стен на объем конденсата и снижение теплозащитных свойств // Труды XIV Международного симпозиума «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение», 18-20 марта 2014 г., Казань, с. 521-525.
5. Куприянов В.Н. К расчету конденсата в ограждающих конструкциях // Сб. научных трудов РААСН за 2020 г. М: Издательство АСВ, 2021, том 2, с. 273–287.
6. Куприянов В.Н., Сафин И.Ш. Влияние наружных облицовочных слоев на процесс конденсации парообразной влаги в ограждающих конструкциях // Приволжский научный журнал, Н. Новгород, ННГАСУ, 2014, №1, с. 46-50.
7. Куприянов В.Н. К вопросу о паропроницаемости ограждающих конструкций/ Куприянов В.Н., Сафин И.Ш., Хабибуллина А.Г. // Журнал РААСН ACADEMIA, Москва, 2009, №5, с. 504-507.
8. Куприянов В.Н. Прогнозирование переувлажнения ограждающих конструкций при конденсации в них водяного пара // Приволжский научный журнал, 2021, №2, с. 84-90.
9. Kupriyanov V.N. Dew point temperature as overwetting indicator of enclosing structures // E35 Web of Conferences, 274.07002 (2021)
10. Куприянов В.Н. Влияние конструкции ограждения на конденсацию парообразной влаги / В.Н. Куприянов, И.Ш. Сафин, М.Р. Шамсутдинов // «Жилищное строительство», Москва, 2012, № 6, с. 29-31.
11. Куприянов В.Н. Основные принципы конструирования наружных стен с ограничением конденсации в них парообразной влаги // «Строительство и реконструкция», научно-технический журнал, г. Орел, ФГБОУ ВПО «Государственный университет УНПУ», 2015, №2 (85), с. 120-127.
12. Строительная климатология: Справочное пособие к СНиП 23-01-99* / под ред. В.К. Савина. – М.: НИИ строительной физики РААСН, 2006. – 258 с.
13. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Части 1-6, вып. 12. – Л.: Гидрометеиздат, 1988.
14. Petrov A.S. Kupriyanov V.N. Determination of Humidity Conditions of Enclosing Structures by the Color Indicator Method // Журнал «IOP Conference Series: Materials Science and Engineering» 2018, #463 (2018) 022064. doi: 10.1088/1757 - 899X/463/2/022064.
15. Petrov A.S. Kupriyanov V.N. Study of the Dependence of Equilibrium Sorption Humidity of Heat-insulating Products on Temperature // E35 Web of Conferences, 2021, 274.04008.

References

1. Davidiyuk A.N., Nesvetaev G.V. Designing a rational multilayer building envelope according to the criterion of protection from moisture // Stroitel'nye materialy, 2008, No. 8, p. 48-50.
2. Hens H. Building physics - Heat, Air and Moisture, Ernst and Sohn, Germany, Berlin, 2007, 270 p.
3. Fokin K.F. Construction heat engineering of enclosing parts of buildings. 5th ed., revised. M.: Publishing house "AVOK-PRESS". 2006. - 256 p.
4. Kupriyanov V.N., Safin I.Sh. Influence of external wall structures on the volume of condensate and decrease in heat-shielding properties // Proceedings of the XIV International Symposium "Energy and Resource Efficiency and Energy Saving", March 18-20, 2014, Kazan, p. 521-525.

5. Kupriyanov V.N. To the calculation of condensate in building envelopes // *Sat. scientific papers of the RAASN for 2020*. M: DIA Publishing House, 2021, volume 2, p. 273–287.
6. Kupriyanov V.N., Safin I.Sh. Influence of outer facing layers on the process of condensation of vaporous moisture in building envelopes // *Privolzhsky scientific journal, Nizhny Novgorod, NNGASU*, 2014, no. 1, p. 46-50.
7. Kupriyanov V.N. On the issue of vapor permeability of enclosing structures / Kupriyanov V.N., Safin I.Sh., Khabibullina A.G. // *Journal PAACH ACADEMIA*, Moscow, 2009, No. 5, p. 504-507.
8. Kupriyanov V.N. Forecasting waterlogging of building envelopes during condensation of water vapor in them // *Privolzhsky scientific journal*, 2021, no. 2, p. 84-90.
9. Kupriyanov V.N. Dew point temperature as overwetting indicator of enclosing structures // *E35 Web of Conferences*, 274.07002 (2021)
10. Kupriyanov V.N. Influence of the design of the fence on the condensation of vaporous moisture / V.N. Kupriyanov, I.Sh. Safin, M.R. Shamsutdinov // *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, Moscow, 2012, No. 6, p. 29-31.
11. Kupriyanov V.N. Basic principles for designing external walls with limited condensation of vaporous moisture in them // "Construction and Reconstruction", scientific and technical journal, Orel, FGBOU VPO "State University of UNPU", 2015, No. 2 (85), p. 120-127.
12. Building climatology: Reference manual to SNiP 23-01-99* / ed. VC. Savina. - M.: Research Institute of Building Physics RAASN, 2006. - 258 p.
13. Scientific and applied reference book on the climate of the USSR. Series 3. Parts 1-6, no. 12. - L.: Gidrometeoizdat, 1988.
14. Petrov A.S. Kupriyanov V.N. Determination of Humidity Conditions of Enclosing Structures by the Color Indicator Method // «IOP Conference Series: Materials Science and Engineering» 2018, #463 (2018) 022064. doi: 10.1088/1757 - 899X/463/2/022064.
15. Petrov A.S. Kupriyanov V.N. Study of the Dependence of Equilibrium Sorption Humidity of Heat-insulating Products on Temperature // *E35 Web of Conferences*, 2021, 274.04008.

Информация об авторах

Валерий Ниолаевич Куприянов, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
E-mail: kuprivan@kgasu.ru

Information about the authors.

Valeriy N. Kupriyanov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
E-mail: kuprivan@kgasu.ru

DOI: 10.52409/20731523_2022_1_41

УДК 69.07

Экономическая эффективность применения колонн прямоугольного сечения одноэтажных производственных зданий с мостовыми кранами из высокопрочного песчаного бетона

Н.Г.Палагин¹, Г.П. Никитин², А.Н.Трунов³¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет²АО «Казанский Гипростройавиатранс им. Б.И. Тихомирова»³ООО «Химпромпроект»

Аннотация: проведение исследований вызвано тем, что на Европейской части Российской Федерации в основном присутствуют месторождения осадочных карбонатных пород, мало пригодных для использования в железобетонных конструкциях. В то же время повсеместно имеются залежи песка, использование которого в качестве заполнителя для получения бетона вместо щебня является более экологичным. Также известно об экономической эффективности проектирования несущих конструкций из высокопрочных тяжелых бетонов.

Выполнены исследования по определению экономической эффективности применения колонн прямоугольного сечения одноэтажных производственных зданий с мостовыми кранами (серия 1.424.1–5) из высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 в сравнении с колоннами из тяжелого бетона классов В20...В80 по отношению к городу Казань.

Задачами, поставленными в исследованиях было сравнение общего расхода стали и общей стоимости материалов колонн из высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 в сопоставлении с колоннами из тяжелого бетона классов В20...В80.

Исследования выполнены по инженерной методике на основе действующих норм с применением ПК MS Excel. Механические характеристики песчаного бетона приняты на основе результатов исследований кафедры ТСМиК КГАСУ на песках местных месторождений.

При увеличении класса тяжелого и высокопрочного песчаного бетонов снижается общий расход стали и, как правило, уменьшается общая стоимость материалов. При проектировании колонн из высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 и высокопрочного тяжелого бетона классов В60 и В80 эти показатели отличаются в пределах от – 1,8 до + 1,4 %.

Важное значение полученных результатов для строительной отрасли Российской Федерации состоит в выявлении экономичных решений колонн прямоугольного сечения одноэтажных производственных зданий с мостовыми кранами по общей стоимости материалов и расходу стали в зависимости от класса тяжелого и высокопрочного песчаного бетона.

Ключевые слова: высокопрочный песчаный бетон, тяжелый бетон, экономическая эффективность, ресурсосбережение, колонны прямоугольного сечения, одноэтажные промышленные здания, мостовые краны.

Для цитирования: Н.Г. Палагин, Г.П. Никитин, А.Н. Трунов. Экономическая эффективность применения колонн прямоугольного сечения одноэтажных производственных зданий с мостовыми кранами из высокопрочного песчаного бетона//Известия КГАСУ 2022 № 1(59). С 41-53. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_41

Economic efficiency of manufacturing rectangular columns of one-story industrial buildings with overhead cranes from high-strength sand concrete

Abstract

N.G.Palagin¹, G.P.Nikitin², A.N.Trunov³

¹Kazan State University of Architecture and Engineering

²JSC «Kazan Giproniaviaprom them. B.I. Tikhomirov»

³LLC «Khimpromproekt»

Abstract: the research is due to the fact that in the European part of the Russian Federation there are mainly deposits of sedimentary carbonate rocks, which are not very suitable for use in reinforced concrete structures. At the same time, there are deposits of sand everywhere, the use of which as an aggregate for concrete instead of crushed stone is more environmentally friendly. It is also known about the economic efficiency of designing load-bearing structures made of high-strength heavy concrete.

Studies have been carried out to determine the economic efficiency of manufacturing rectangular columns of one-story industrial buildings with overhead cranes (series 1.424.1–5) from high-strength sand concrete of classes VPB60 and VPB80 in comparison with columns made of heavy concrete of classes B20 ... B80 in relation to the city of Kazan.

The objectives of the research were to compare the total consumption of steel and the total cost of materials for columns made of high-strength sand concrete of classes VPB60 and VPB80 in comparison with columns made of heavy concrete of classes B20...B80.

The studies were carried out according to the engineering methodology based on current standards using MS Excel. The mechanical characteristics of sand concrete are taken on the basis of the results of research by the department of TSMiK KSUAU on the sands of local deposits.

With an increase in the class of heavy and high-strength sand concrete, the total consumption of steel decreases and, as a rule, the total cost of materials decreases. When designing columns made of high-strength sand concrete of classes VPB60 and VPB80 and high-strength heavy concrete of classes B60 and B80, these indicators differ from - 1.8 to + 1.4%.

The importance of the obtained results for the construction industry of the Russian Federation is to identify cost-effective solutions for rectangular columns of one-story industrial buildings with overhead cranes in terms of the total cost of materials and steel consumption, depending on the class of heavy and high-strength sand concrete.

Key words: high-strength sand concrete, heavy concrete, economic efficiency, resource saving, rectangular columns, one-story industrial buildings, overhead cranes.

For citation: N.G. Palagin, G.P. Nikitin, A.N. Trunov. Economic efficiency of manufacturing rectangular columns of one-story industrial buildings with overhead cranes from high-strength sand concrete Abstract//News KSUAU 2022 № 1(59). С 41-53.

DOI: 10.52409/20731523_2022_1_41

1. Введение

Объектом исследований являются железобетонные колонны прямоугольного сечения одноэтажных промышленных зданий с мостовыми кранами (серия 1.424.1–5).

В зарубежном строительстве все больше находят применение высокопрочные тяжелые бетоны, позволяющие снижать размеры сечений элементов и экономить бетон и арматуру [1]. В Российской Федерации использование таких бетонов началось значительно позднее, чем за рубежом. Наиболее известными объектами в нашей стране из тяжелого бетона классов В80...В90 являются комплексы «Федерация» ММДЦ «Москва Сити» в г. Москва [2] и «Лахта-Центр» в г. Санкт-Петербург [3].

Альтернативным решением относительно высокопрочного тяжелого бетона является применение высокопрочного песчаного бетона (ВПБ) [4]. В его состав входит кварцевый песок, разделенный на фракции, высокоактивный вяжущий материал,

минеральные и химические добавки, органо-минеральные модификаторы. В качестве химических добавок применяются, как правило, пластификаторы, позволяющие заметно снизить расход цемента и водоцементное отношение бетонной смеси: Sika VC5–800, Melflux 2651, C–3 [5] и другие (СП–1, Sika 5NEW, Reotech DR8500, Melflux 2641).

Использование песчаного бетона имеет следующие важные преимущества относительно тяжелого бетона: однородную структуру высокого качества и повышенную технологичность, отсутствие необходимости в наличии складского и сортировочного помещений для приемки, переработки и складирования крупного заполнителя, более низкий расход энергии и меньшую трудоемкость, возможность возведения тонкостенных конструкций и получения декоративных бетонов.

Кроме того, высокопрочный песчаный бетон сравнительно с равнопрочным тяжелым бетоном имеет повышенную прочность на сжатие и растяжение, водо- и газонепроницаемость, износостойкость и морозостойкость, более высокую стойкость против коррозии. Это обусловлено повышением количества контактов цементного камня с мелким заполнителем, а также, вследствие использования суперпластификаторов и минеральных добавок, снижением пористости в зоне их контакта.

Следует отметить, что из-за большой поверхности заполнителей песчаные бетоны относительно тяжелого бетона того же класса имеют увеличенный на 15–20 % расход цемента. По этой причине в их состав совместно с пластифицирующими вводят также минеральные добавки или при их производстве применяют цементы низкой водопотребности, или композиционные цементы. Также песчаные бетоны имеют увеличенное воздухововлечение, для уменьшения которого применяют высокоэффективные разжижители (напр., молотый кварцевый песок, микрокремнезем марки МК–85, суперпластификатор Melflux 2651 F) или пеногасители [5].

Применение песчаного бетона в строительной отрасли нашей страны обусловлено повсеместным наличием месторождений песка. Например, в Республике Татарстан их количество составляет более 50. Запасы строительных песков составляют около 1 млрд. м³, в том числе доступные для использования – почти 300 млн. м³. В соответствии с концепцией экологической безопасности республики и развития ее природно-ресурсного комплекса в период до 2030 года перед промышленностью по производству строительных материалов поставлена цель повышения состава продукции на основе местных природных запасов.

В связи с тем, что на Европейской части Российской Федерации в основном присутствуют месторождения осадочных карбонатных пород, которые мало пригодны для использования в железобетонных конструкциях, а запасы изверженных пород крупного заполнителя ограничены, применение песчаного бетона при их изготовлении является актуальным. Кроме того, на добычу камня и его дальнейшую переработку на щебень необходимо затратить значительное количество энергетических и трудовых ресурсов. Сопутствующим результатом при получении щебня фракции более 5 мм является образование значительного количества (до 20–30%) отсевов фракции менее 5 мм, которые занимают большие площади и тем самым нарушают экологическое равновесие природы. Лишь небольшое количество этих отходов применяется при получении известняковой муки и минерального порошка при производстве асфальтобетона. Разрушение гор при добыче щебня явилось причиной необратимых климатических последствий в Карелии, Поволжье и Северном Кавказе. Применение в качестве заполнителя для получения бетона песка вместо щебня является более экологичным.

Использование высокопрочных песчаных бетонов на основе фракционированных речных песков Республики Татарстан с применением химических и минеральных добавок является альтернативным решением в сравнении с традиционными тяжелыми бетонами, в состав которых входит высокопрочный щебень, поставляемый с Урала.

В КГАСУ на кафедре ТСМиК на базе песков местных месторождений рек Волги и Камы получены составы высокопрочных песчаных бетонов классов ВПБ60...ВПБ80, прочностные характеристики которых (R_b , R_{bt} , $R_{b,ser}$, $R_{bt,ser}$) больше значений для тяжелого бетона тех же классов в 1,05...2,05 раза, а модуль упругости E_b меньше в 1,02...1,04 раза [6].

Выполненный обзор показал, что в зарубежных и отечественных источниках практически отсутствуют результаты исследований по применению в несущих конструкциях песчаного бетона. Как правило, исследуются вопросы подбора их состава [7–11] и долговечности [12, 13]. Выполняются также работы по определению их различных механических характеристик [14–17].

В [18] и [19] приводятся сведения о большом потенциале использования песчаных бетонов в строительстве зданий и сооружений методом 3D-печати. Значительное количество исследований подтверждает эффективность их применения, обусловленную отсутствием в составе крупного заполнителя, присутствие которого приводит к дефектам структуры бетона и большим деформациям свеженапечатанных слоев.

Вопрос экономичности использования высокопрочных песчаных бетонов в несущих конструкциях исследуется в работах [20–21], а также в статье авторов из КГАСУ и БГТУ им. В.Г. Шухова Палагина Н.Г., Ахметова М.М., Гридчина А.М., Череватовой А.В. «Экономическая целесообразность изготовления многпустотных плит перекрытий из высокопрочного песчаного бетона // Известия КГАСУ. 2021. №4 (58). С. 26-38. DOI: 10.52409/20731523_2021_4_26».

Результаты исследований по выявлению экономической целесообразности применения длинных цилиндрических оболочек из сборного и монолитного высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 по сравнению с использованием их из тяжелого бетона классов В20...В80 приведены в [20]. Установлено, что по отношению к городу Казань применение ВПБ по сравнению с тяжелым позволяет заметно снизить расход материалов (стали – до 30,6 %, бетона – до 15,9 %) и их общую стоимость (до 20,3 %). В работе [21] выявлено, что использование пологих оболочек положительной гауссовой кривизны из сборного и монолитного высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 сравнительно с применением их из тяжелых классов В25...В80 по отношению к городу Казань также в значительной степени снижает расход материалов (стали – до 43,0 %, бетона – до 12,9 %) и общую стоимость материалов – до 29,4 %. В статье Палагина Н.Г., Ахметова М.М., Гридчина А.М., Череватовой А.В. (см. выше) получено, что по отношению к городу Казань применение круглопустотных плит перекрытий высотой 220 мм с пустотами диаметром 159 мм, армированных ненапрягаемой арматурой класса А500С (серия 1.141–1, выпуск 60) и напрягаемой арматурой класса А800 (серия 1.141–1, выпуск 63) из ВПБ классов ВПБ60 и ВПБ80 оказалось самым дорогим по стоимости материалов в сравнении с плитами из тяжелого бетона классов В15...В80. Они получились дороже на 28,6 %...37,0 % относительно самых экономичных решений плит из тяжелого бетона класса В15 с ненапрягаемой арматурой, и на 15,8 %...28,7 % в сравнении с плитами из тяжелого бетона класса В20 с напрягаемой арматурой.

Несмотря на указанные выше преимущества, в настоящий момент в России и Республике Татарстан использование песчаного бетона ограничивается, в основном, покрытиями для полов промышленных зданий и изготовлением мелкоштучных и декоративных отделочных изделий.

Согласно вышесказанному, следует продолжать работу по применению ВПБ при изготовлении различных строительных конструкций, в т.ч. несущих. Одним из основных критериев целесообразности его использования может быть экономическая эффективность. В соответствии с этим тема, рассматриваемая в статье, является актуальной для развития строительной отрасли как Республики Татарстан, так и России в целом.

Цель исследований – определение экономической эффективности применения колонн прямоугольного сечения одноэтажных производственных зданий с мостовыми кранами (серия 1.424.1–5) из высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 в сравнении с колоннами из тяжелого бетона классов В20...В80 по отношению к городу Казань.

Задачи исследований:

1. определить влияние увеличения класса тяжелого и высокопрочного песчаного бетона колонн на общий расход стали и общую стоимость материалов;

2. сравнить технико-экономические показатели колонн из высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 с показателями колонн из тяжелого бетона традиционных классов В20...В40.

2. Материалы и методы

В качестве примера были рассмотрены колонны одноэтажного производственного здания со следующим объемно-планировочным и конструктивным решением: длина здания – 72 м, число пролетов – 2, пролет $L=24$ м, шаг колонн $B=12$ м, ригель – железобетонная безраскосная стропильная ферма ФБ24П по серии 1.463.1–3/87, плиты покрытия – ребристые размером 12×3 м с приведенной толщиной 89,7 мм по серии 1.465.1–15, стеновые панели – однослойные керамзитобетонные по серии 1.432–3, подкрановые балки – железобетонные по серии 1.426.1–4. В каждом пролете расположено по 2 мостовых крана с режимом работы А4 по ГОСТ 34017–2016. Привязка колонн крайних продольных рядов к координационным осям, в соответствии с СП 355.1325800.2017 «Конструкции каркасные железобетонные сборные одноэтажных зданий производственного назначения. Правила проектирования», принята равной 250 мм (рис. 1).

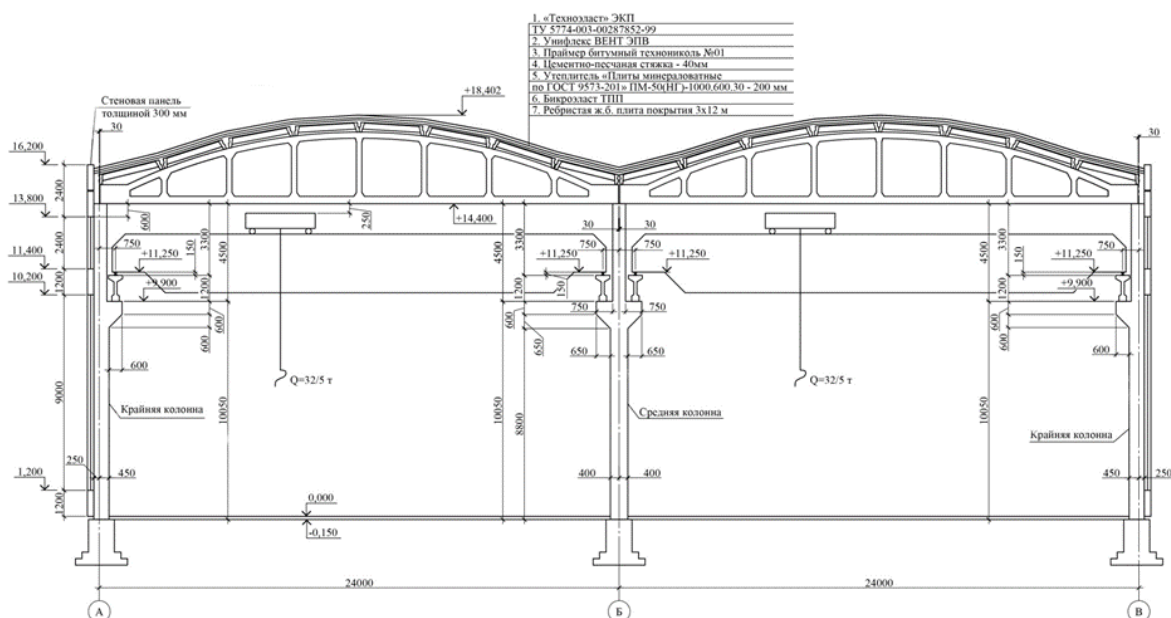


Рис. 1 Поперечный разрез одноэтажного производственного здания с мостовыми кранами (иллюстрация авторов)

Рассмотрено 2 крайних варианта высоты здания ($H_0=14,4$ м и $H_0=8,4$ м) и грузоподъемности кранов ($Q=32/5$ т и $Q=10$ т). Технические и геометрические характеристики кранов приняты по ГОСТ 25711-83. Для определения нагрузок от собственного веса кровли и стенового ограждения предварительно был выполнен их теплотехнический расчет. По результатам компоновки поперечной рамы здания приняты колонны со следующими сечениями (b –ширина) $\times$ (h –высота): крайняя колонна – 400×600 мм (надкрановая часть), 400×700 мм (подкрановая часть), средняя колонна – 400×600 мм (надкрановая часть), 400×800 мм (подкрановая часть). Сбор нагрузок выполнен согласно СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия» (с изменениями № 1, № 2, № 3). Тип местности – В. Класс сооружения – КС–2.

Определение изгибающих моментов M , продольных N и поперечных сил Q в 3 расчетных сечениях крайней и средней колонн (чуть выше и ниже верха подкрановой консоли и на уровне верхнего обреза фундамента) выполнялось по инженерной методике СП 355.1325800. Предварительно была составлена программа расчета в ПК MS Excel, тестирование которой показало полную сходимость с результатами ручного счета.

С помощью указанной программы были определены усилия от всех полных расчетных и нормативных нагрузок (постоянной, снеговой, крановой вертикальной и горизонтальной, ветровой) и от длительной части расчетной и нормативной снеговой

нагрузки. Всего вычисление усилий производилось от всех 17 возможных нагружений, что отсутствует в отечественной литературе.

В соответствии с СП 355.1325800, во всех расчетных сечениях колонн были составлены следующие расчетные сочетания усилий: 1) $M_{\max} N$; 2) $M_{\min} N$; 3) $N_{\max} M_{\max} (M_{\min})$; 4) $N_{\min} M_{\max} (M_{\min})$. Правила выбора загружений и коэффициенты сочетаний ψ_{li} , ψ_{ti} и $\psi_{кр}$ принимались по СП 20.13330.

На расчетные сочетания усилий выполнены расчеты по I и II группе предельных состояний. Расчет по I группе предельных состояний включал расчеты по прочности нормальных сечений ствола колонны в плоскости и из плоскости поперечной рамы и наклонных сечений ствола колонны в плоскости поперечной рамы, расчет прочности консоли по нормальным и наклонным сечениям. При этом определение площади продольной арматуры ствола колонны в плоскости поперечной рамы производилось по формулам симметричного и несимметричного армирования независимо от соотношения величин разнонаправленных изгибающих моментов. Расчет по II группе предельных состояний состоял из расчетов по образованию и раскрытию нормальных трещин. При расчетах использовались следующие нормативные документы: СП 63.13330.2018 «СНиП 52–01–2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» (с изменениями № 1, № 2), СП 311.1325800.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции из высокопрочных бетонов. Правила проектирования», методическое пособие «Расчет железобетонных конструкций без предварительно напряженной арматуры (к СП 63.13330.2012)» – М., 2015.

Прочностные и деформативные характеристики тяжелого бетона и арматуры принимались в соответствии с вышеуказанными нормами, а высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 – согласно результатам исследований кафедры ТСМиК КГАСУ, полученных для бетонов на песках местных месторождений. Значения расчетного сопротивления бетона осевому сжатию (R_b) и растяжению (R_{bt}) для тяжелого бетона класса В80 и высокопрочного песчаного бетона класса ВПБ80 приняты с учетом понижающего коэффициента, учитывающего увеличение хрупкости высокопрочных бетонов в связи с уменьшением деформаций ползучести ($\gamma_{b,br}$), равного

$$\gamma_{b,br} = (360 - B) / 300, \quad (1)$$

где В – класс бетона.

Класс продольной арматуры – А500С, поперечной и конструктивной – А240С и В500С, уголкового и листового проката – из стали С245. Сетки и каркасы изготавливались с выполнением условия свариваемости. Конструкция закладных изделий, сеток оголовка, монтажных петель и деталей принималась по типовой серии.

Коэффициент надежности по ответственности (γ_n) равен 1,0.

Для автоматизации расчетов было составлено 6 блок–схем и соответствующая им единая программа расчета в MS Excel, тестирование которой показало полную сходимость с результатами ручного счета. По данной программе были выполнены расчеты крайней и средней колонн при указанных выше вариантах высоты здания и грузоподъемности кранов при классах тяжелого бетона В20, В30, В40, В60 и В80 и высокопрочного песчаного бетона ВПБ60 и ВПБ80. С учетом различных вариантов типа колонн (крайняя и средняя), высоты здания ($H_0=14,4$ м и $H_0=8,4$ м), грузоподъемности мостовых кранов ($Q=32/5$ т и $Q=10$ т), видов и классов бетона общее число расчетных случаев составило 56.

Для всех рассмотренных случаев, с помощью, составленной в MS Excel программы, определялся расход материалов (бетона и арматуры), а также суммарная их стоимость. Стоимость обоих видов бетона и арматуры принята по ценам, актуальным для города Казани на февраль 2022 г.

3. Результаты

Результаты расчетов зависимости расхода стали и общей стоимости материалов (арматуры, стального проката и бетона) для 56 рассмотренных случаев, отличающихся типом колонны, высотой здания, грузоподъемностью мостовых кранов, видом и классом бетона, приведены на рис. 2...4 и таблице.

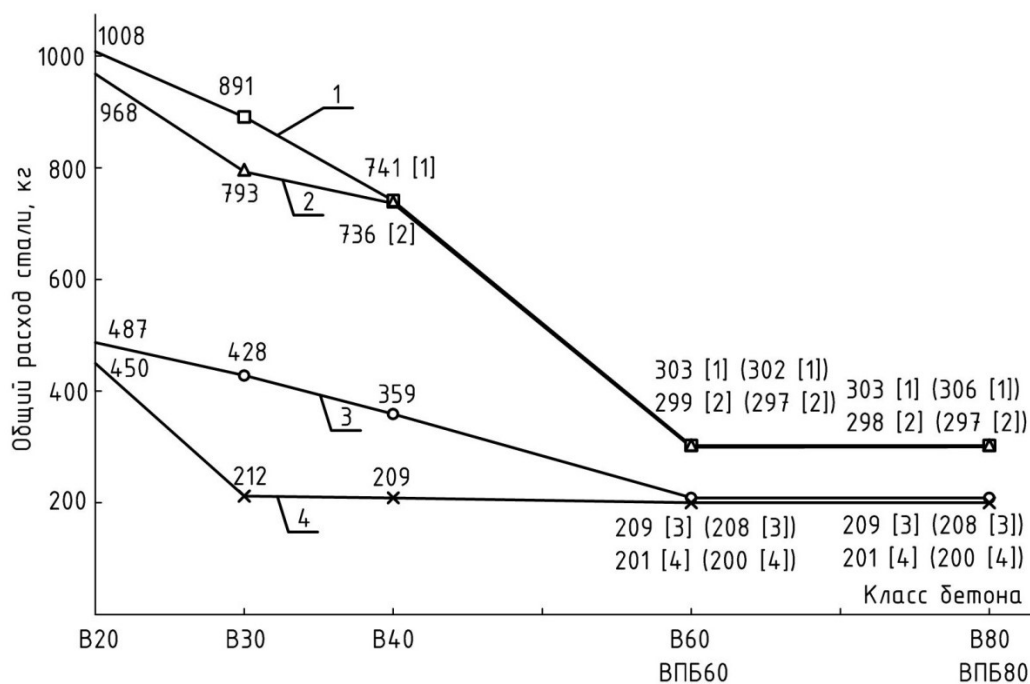


Рис. 2. Графики зависимости общего расхода стали в крайней колонне от вида и класса бетона.

1 – $H_0=14,4$ м, $Q=32/5$ т; 2 – $H_0=14,4$ м, $Q=10$ т; 3 – $H_0=8,4$ м, $Q=32/5$ т; 4 – $H_0=8,4$ м, $Q=10$ т (иллюстрация авторов). В круглых скобках приведены значения для классов ВПБ60 и ВПБ80

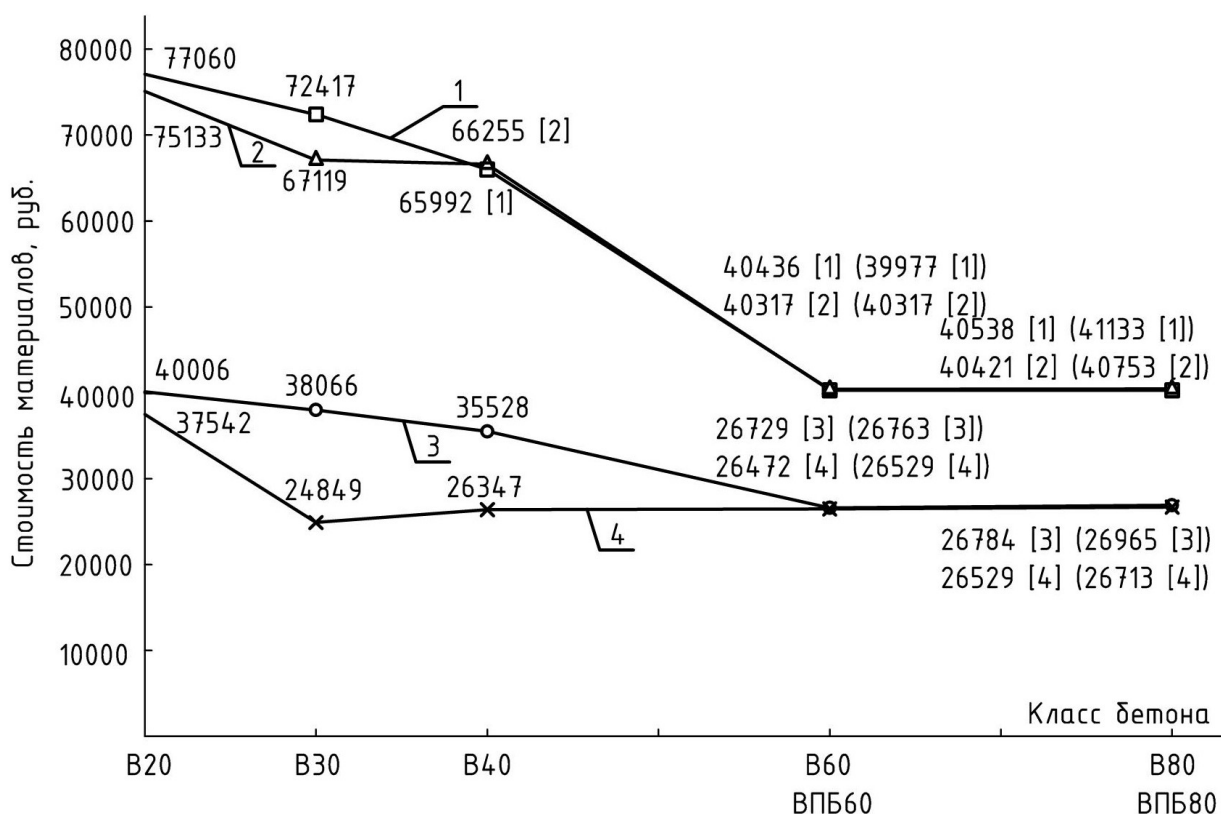


Рис. 3. Графики зависимости общей стоимости материалов крайней колонны от вида и класса бетона. 1 – $H_0=14,4$ м, $Q=32/5$ т; 2 – $H_0=14,4$ м, $Q=10$ т; 3 – $H_0=8,4$ м, $Q=32/5$ т; 4 – $H_0=8,4$ м, $Q=10$ т (иллюстрация авторов). В круглых скобках приведены значения для классов ВПБ60 и ВПБ80

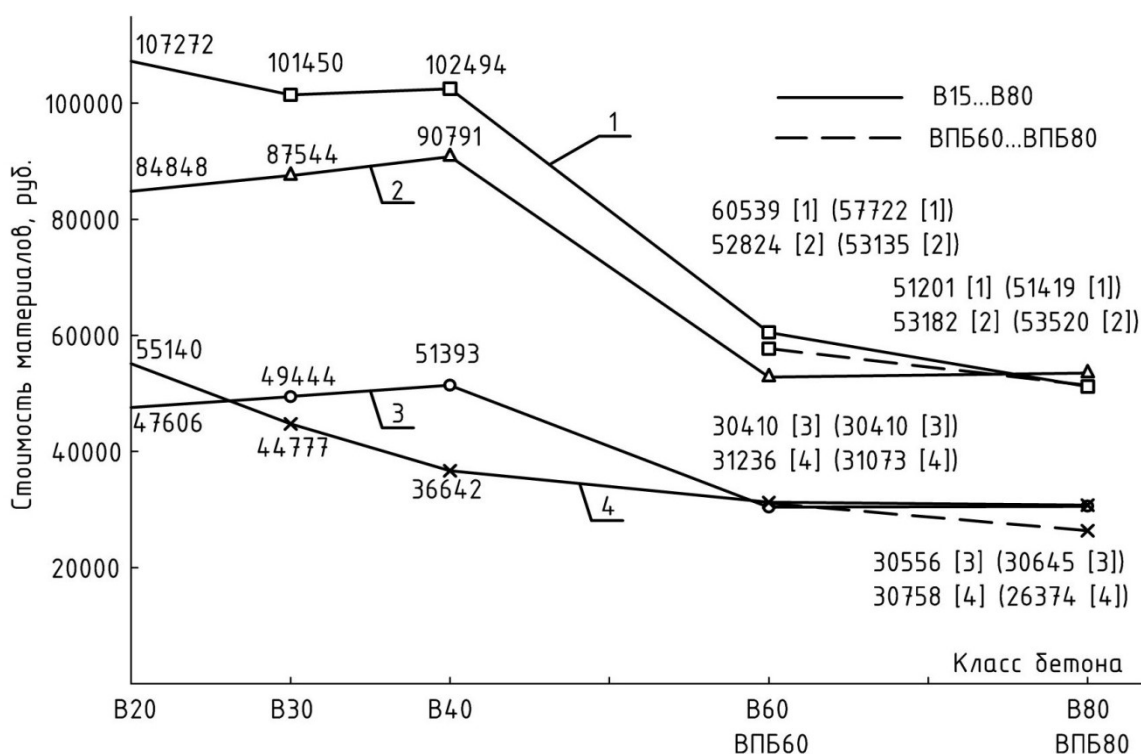


Рис. 4. Графики зависимости общей стоимости материалов средней колонны от вида и класса бетона. 1 – $H_0=14,4$ м, $Q=32/5$ т; 2 – $H_0=14,4$ м, $Q=10$ т; 3 – $H_0=8,4$ м, $Q=32/5$ т; 4 – $H_0=8,4$ м, $Q=10$ т (иллюстрация авторов). В круглых скобках приведены значения для классов ВПБ60 и ВПБ80

Таблица

Общий расход стали в крайней и средней колоннах

№ варианта	Высота здания Н ₀ , грузоподъ- ёмность кранов Q	Класс тяжелого бетона					Класс высокопрочного песчаного бетона	
		B20	B30	B40	B60	B80	ВПБ60	ВПБ80
Крайняя колонна								
1	Н ₀ =14,4 м, Q=32/5 т	<u>1008</u> 0	<u>891</u> 11,6	<u>741</u> 26,5	<u>303</u> 69,9	<u>303</u> 69,9	<u>302</u> 70,0	<u>306</u> 69,6
2	Н ₀ =14,4 м, Q=10 т	<u>968</u> 0	<u>793</u> 18,1	<u>736</u> 24,0	<u>299</u> 69,1	<u>298</u> 69,2	<u>297</u> 69,3	<u>297</u> 69,3
3	Н ₀ =8,4 м, Q=32/5 т	<u>450</u> 0	<u>212</u> 52,9	<u>209</u> 53,6	<u>209</u> 53,6	<u>209</u> 53,6	<u>208</u> 53,8	<u>208</u> 53,8
4	Н ₀ =8,4 м, Q=10 т	<u>487</u> 0	<u>428</u> 12,1	<u>359</u> 26,3	<u>201</u> 58,7	<u>201</u> 58,7	<u>200</u> 58,9	<u>200</u> 58,9
Средняя колонна								
5	Н ₀ =14,4 м, Q=32/5 т	<u>1459</u> 0	<u>1315</u> 1,4	<u>1278</u> 12,4	<u>580</u> 60,2	<u>420</u> 71,2	<u>530</u> 63,7	<u>416</u> 71,5
6	Н ₀ =14,4 м, Q=10 т	<u>1086</u> 0	<u>1079</u> 0,6	<u>1079</u> 0,6	<u>446</u> 58,9	<u>448</u> 58,7	<u>446</u> 58,9	<u>446</u> 58,9
7	Н ₀ =8,4 м, Q=32/5 т	<u>719</u> 0	<u>509</u> 29,2	<u>476</u> 33,8	<u>245</u> 65,9	<u>235</u> 67,3	<u>241</u> 66,5	<u>231</u> 67,9
8	Н ₀ =8,4 м, Q=10 т	<u>581</u> 0	<u>579</u> 0,3	<u>578</u> 0,5	<u>225</u> 61,3	<u>226</u> 61,1	<u>222</u> 61,8	<u>222</u> 61,8
Пр и м е ч а н и е – В числителе приведен расход стали в кг, в знаменателе – экономия в %.								

Сравнение технико-экономических показателей колонн из тяжелого бетона классов B20...B80 и высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 для 8

рассмотренных вариантов типов колонн (крайняя и средняя), высоты здания H_0 ($H_0=14,4$ м и $H_0=8,4$ м) и грузоподъемности мостовых кранов Q ($Q=32/5$ т и $Q=10$ т) показало следующее:

- по общей стоимости материалов самым экономичным в 1 случае из 8 оказалось применение колонн из тяжелого бетона классов В80 и из высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80, в 2 случае – из тяжелого бетона класса В60, а также одновременно из тяжелого бетона класса В60 и из высокопрочного песчаного бетона класса ВПБ60. Экономия по сравнению с изготовлением колонн из тяжелого бетона традиционных классов В20...В40 составляет от 24,8 % до 109,5 %. Еще в 1 случае ($H_0=8,4$ м, $Q=10$ т), наименьшую стоимость имела крайняя колонна из тяжелого бетона класса В30, экономия по сравнению с применением ее из высокопрочного бетона классов В60, В80, ВПБ60 и ВПБ80 составила от 6,5 % до 7,5 %;

- общая стоимость материалов при применении колонн из высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60, ВПБ80 и из тяжелого бетона классов В60, В80 в 6 случаях из 8 отличается незначительно (разница составляет от – 0,9 % до + 1,4 %), в 2

случаях (средняя колонна, $H_0=8,4$ м, $Q=10$ т и $H_0=14,4$ м, $Q=32/5$ т) расхождение получилось более значительным и составило +18,4 % и – 12,7 % соответственно;

- увеличение класса тяжелого бетона колонн с В60 до В80 в 6 случаях из 8 не дает снижения общей стоимости материалов (при этом экономия при применении тяжелого бетона класса В60 составляет 0,2...0,7 %), в 2 случаях (средняя колонна при $H_0=8,4$ м, $Q=10$ т и $H_0=14,4$ м, $Q=32/5$ т) использование тяжелого бетона класса В80 оказалось экономичнее на 1,6 % и 18,2 % соответственно;

- повышение класса высокопрочного песчаного бетона колонн с ВПБ60 до ВПБ80 в 6 случаях из 8 не дает снижения общей стоимости материалов (при этом экономия при применении бетона класса ВПБ60 составляет 0,7...2,9 %), в 2 случаях (средняя колонна при $H_0=8,4$ м, $Q=10$ т и $H_0=14,4$ м, $Q=32/5$ т) использование бетона класса ВПБ80 оказалось экономичнее на 0,6 % и 17,8 % соответственно;

- повышение класса бетона ведет к снижению общего расхода стали. Так, применение колонн из высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 в сравнении с применением их из тяжелого бетона класса В20 снижает общий расход стали на 53,8...71,5 %, а применение из высокопрочного тяжелого бетона классов В60 и В80 – на 53,6...69,9 % (рис. 2 и таблица);

- при повышении класса высокопрочного песчаного бетона колонн с ВПБ60 до ВПБ80 общий расход стали, как правило, отличается незначительно (от – 0,4 % до + 1,3 %). Лишь в 1 случае из 16 (средняя колонна при $H_0=14,4$ м, $Q=32/5$ т) экономия стали при применении бетона класса ВПБ80 по сравнению с использованием бетона класса ВПБ60 составляет 21,5 % (таблица);

- при повышении класса тяжелого бетона колонн с В60 до В80 общий расход стали, как правило, отличается незначительно (от – 4,1 % до + 0,4 %). Лишь в 1 случае из 16 (средняя колонна при $H_0=14,4$ м, $Q=32/5$ т) экономия стали при применении бетона класса В80 по сравнению с использованием класса В60 составляет 27,6 % (таблица);

- общий расход стали при применении колонн из высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 практически такой же, что и при применении их из высокопрочного тяжелого бетона классов В60 и В80, соответственно. Разница составляет от – 1,8 % до + 0,3 %. Лишь в 1 случае из 16 (средняя колонна при $H_0=14,4$ м, $Q=32/5$ т) экономия стали при применении высокопрочного песчаного бетона класса ВПБ 60 составила 8,6 % по сравнению с использованием бетона класса В60 (таблица).

Кроме того, в результате расчетов было выявлено следующее:

- при разнице величин разнонаправленных изгибающих моментов по абсолютной величине более 25 % расчет ствола колонны по методике несимметричного армирования дает меньшую на 10...50 % площадь продольной арматуры, чем по методике симметричного армирования. При разнице моментов не более 25 % расчеты по обоим методикам дают близкие значения площадей. Следует отметить, что в отечественной литературе при разнице моментов не более 25 % расчет рекомендуется выполнять по методике симметричного армирования, а при разнице более 25 % – по методике несимметричного армирования;

– во всех рассмотренных случаях прочность ствола колонны по наклонному сечению обеспечивалась за счет только прочности бетона, требования по трещиностойкости его нормальных сечений выполнялись при количестве арматуры, установленной из расчета по I группе предельных состояний, прочность консолей по наклонным сечениям обеспечивалась одним бетоном;

– для обеспечения прочности нормальных сечений ствола колонны из плоскости поперечной рамы, иногда приходилось принимать количество продольной арматуры большее, определенной расчетом в плоскости рамы.

4. Обсуждение

Анализ полученных результатов показывает, что применение колонн прямоугольного сечения одноэтажных производственных зданий с мостовыми кранами из высокопрочного тяжелого и песчаного бетона классов В60, В80 и ВПБ60, ВПБ80 является, как правило, более экономичным по сравнению с применением их из тяжелого бетона традиционных классов В20...В40. Экономия по общему расходу материалов составляет от 24,8 % до 109,5 %.

Повышение класса бетона ведет к снижению общего расхода стали. Так, по сравнению с применением колонн из тяжелого бетона класса В20 использование высокопрочного тяжелого бетона классов В60, В80 уменьшает его на 53,6...69,9 %, а высокопрочного песчаного бетонов классов ВПБ60, ВПБ80 – на 53,8...71,5 %.

Общая стоимость материалов и общий расход стали при применении колонн из высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 и из высокопрочного тяжелого бетона классов В60, В80, как правило, отличаются незначительно. Разница в общей стоимости материалов составляет от – 0,9 % до + 1,4 %, в общем расходе стали – от – 1,8 % до + 0,3 %.

Как правило, по общей стоимости материалов несколько экономичнее является применение колонн из высокопрочного тяжелого бетона класса В60 по сравнению с использованием из бетона класса В80 (экономия – 0,2...0,7 %) и из высокопрочного песчаного бетона класса ВПБ60 по сравнению с использованием из бетона класса ВПБ80 (экономия – 0,7...2,9 %).

Полученные результаты в целом подтверждают результаты рассмотренных в разделе «Введение» ранее проведенных исследований в отношении сборных и монолитных длинных цилиндрических оболочек [17] и пологих оболочек положительной гауссовой кривизны [18], в которых получена экономия общего расхода материалов и стали при применении указанных оболочек из высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 по сравнению с использованием их из тяжелого бетона классов В20...В80.

Полученные в настоящих исследованиях результаты имеют важное значение, т. к. они выявили экономичные решения по расходу материалов в зависимости от класса тяжелого и высокопрочного песчаного бетона для колонн прямоугольного сечения одноэтажных производственных зданий с мостовыми кранами.

5. Заключение

1. Применение колонн прямоугольного сечения одноэтажных производственных зданий с мостовыми кранами из высокопрочного тяжелого и песчаного бетона классов В60, В80 и ВПБ60, ВПБ80 является, как правило, более экономичным по сравнению с использованием их из тяжелого бетона традиционных классов В20...В40.

2. Повышение класса тяжелого и высокопрочного песчаного бетона ведет к снижению общего расхода стали.

3. Общая стоимость материалов и общий расход стали при применении колонн из высокопрочного тяжелого бетона классов В60, В80 и высокопрочного песчаного бетона классов ВПБ60 и ВПБ80 отличаются, как правило, незначительно.

4. Как правило, по общей стоимости материалов несколько экономичнее является применение колонн из высокопрочного тяжелого бетона класса В60 по сравнению с использованием из бетона класса В80 и из высокопрочного песчаного бетона класса ВПБ60 по сравнению с применением из бетона класса ВПБ80.

5. Выполненные исследования выявили экономичные решения по расходу материалов в зависимости от класса тяжелого и высокопрочного песчаного бетона для колонн прямоугольного сечения одноэтажных производственных зданий с мостовыми кранами.

6. В дальнейшем предполагается выполнить аналогичные исследования для двухветвевых колонн прямоугольного сечения, а также для других видов несущих железобетонных конструкций.

Список литературы

1. Mindess S. Developments in the formulation and reinforcement of concrete. 2019. 423 p. DOI: 10.1016/C2017-0-03347-5.
2. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях / С.С. Каприелов, В.И. Травуш, Н.И. Карпенко и др. // Строительные материалы. 2008. №3. С. 9-13.
3. Илюхина Е.А., Лахман С.И., Миллер А.Б., Травуш В.И. Конструктивные решения высотного здания «Лахта Центр» в Санкт-Петербурге // Строительные науки. 2019. № 3. С. 110-121.
4. Карпенко Н.И., Каприелов С.С., Безгодов И.М., Моисеенко Г.А., Степанов М.В. Исследование деформаций усадки мелкозернистого высокопрочного бетона и сталефибробетона при рациональном содержании фибры // Известия высших учебных заведений. Серия «Технология текстильной промышленности». 2018. № 3. С. 227-230.
5. Морозов Н.М., Хозин В.Г., Мугинов Х.Г. Особенности формирования структуры модифицированных песчаных бетонов // Строительные материалы. 2010. № 9. С. 72-73.
6. Морозов Н.М., Хозин В.Г. Песчаный бетон высокой прочности // Строительные материалы. 2005. № 11. С. 25–26.
7. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Низамов Р.К. Карбонатные цементы низкой водопотребности - перспективные вяжущие для бетонов // Бетон и железобетон. 2020. № 1 (601). С. 15-28.
8. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Низамов Р.К., Кашапов Р.Р., Баишев Д.И. Опыт наномодификации цемента низкой водопотребности // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 1. С. 53-57.
9. Вдовин Е.А., Хозин В.Г., Ильина О.Н., Куклин А.Н., Гиздатуллин А.Р., Шарафутдинов Б.Д. Опыт применения полимеркомпозитной арматуры при строительстве бетонных аэродромных покрытий в аэропортовом комплексе г. Казань. Сб. научных трудов: Инновационные материалы, технологии и оборудование для строительства современных транспортных сооружений / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2013. С. 86-90.
10. Boucedra A., Bederina M., Ghernouti Y. Study of the acoustical and thermo-mechanical properties of dune and river sand concretes containing recycled plastic aggregates // Construction and Building Materials. 2020. V. 256. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119447.
11. Ouassila B., Houria H., Leila K., Mouloud B., Assia A., Chaher R.. Valorization of marble's waste as a substitute in sand concrete // Advances in Concrete Construction. 2020. № 9 (2). P. 217-225. DOI:10.12989/acc.2020.9.2.217.
12. Thangapandi K., Anuradha R., Awoyera P. O., Gobinath R., Archana N., Berlin M., Oladimeji O. B. Durability phenomenon in manufactured sand concrete: Effects of zinc oxide and alcofine on behavior // Silicon. 2021. V. 13(4). P. 1079-1085. DOI:10.1007/s12633-020-00494-2.
13. Tolstoy A. D., Fomina E. V., Milkina A. S. Durability of fine-grained high-strength concrete in corrosive environment. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 753 (3). DOI:10.1088/1757-899X/753/3/032036.
14. Peng Z., Li D., Zhou Y., Ren, S.. Failure criterion in stress space for coral reef sand concrete under biaxial compression. Wuhan Ligong Daxue Xuebao/Journal of Wuhan University of Technology. 2018. V. 40 (5). P. 66-70. DOI:10.3963/j.issn.1671-4431.2018.05.011.
15. Li Z., Wang G., Yang S., Ju G. Experimental study on mechanical properties and stress-strain constitutive relations of desert sand concrete. Yingyong Lixue Xuebao // Chinese Journal of Applied Mechanics. 2019. V. 36 (5). P. 1131-1137. DOI:10.11776/cjam.36.05.B063.

16. Li B., Yin L., Fan L. Analysis on flexural fatigue performance of manufactured sand concrete. Jianzhu Cailiao Xuebao // Journal of Building Materials. 2017. V. 20 (5). P. 801-807. DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2017.05.024.
17. Dong Z., Wu G., Xu Y. Bond and flexural behavior of sea sand concrete members reinforced with hybrid steel-composite bars presubjected to wet-dry cycles // Journal of Composites for Construction. 2017. V. 21 (2). DOI:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000749.
18. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Influence of the technological properties of cement-sand mortar on the quality of 3D printed products, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 890 012082 DOI:10.1088/1757-899X/890/1/012082.
19. Mukhametrakhimov R.K., Lukmanova L.V. Structure and properties of mortar printed on a 3D printer // Magazine of Civil Engineering. 2021. V. 102 (2). Article number 10206. DOI: 10.18720/MCE.10206.
20. Palagin N., Dul'miyeva A. Cost-effective design of long cylindrical shells of high-strength sand concrete, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 890 012078. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012078.
21. Palagin N., Nikitin G., Sadrutdinova A. (2022) Erection of Flat Shells of Positive Gaussian Curvature Made from High-Strength Sand Concrete and Its Economic Efficiency. In: Vatin N.I., Tamrazyan A.G., Plotnikov A.N., Leonovich S.N., Pakrastins L., Rakhmonzoda A. (eds) Advances in Construction and Development. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 197. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6593-6_11.

References

1. Mindess S. Developments in the formulation and reinforcement of concrete. 2019. 423 p. DOI:10.1016/C2017-0-03347-5.
2. Modified high-strength concretes of classes B80 and B90 in monolithic structures / S.S. Kaprielov, V.I. Travush, N.I. Karpenko and others // Building materials. 2008. No. 3. P. 9-13.
3. Ilyukhina E.A., Lakhman S.I., Miller A.B., Travush V.I. Constructive solutions for the high-rise building "Lakhta Center" in St. Petersburg // Stroitelnye nauki. 2019. No. 3. P. 110-121.
4. Karpenko N.I., Kaprielov S.S., Bezgodov I.M., Moiseenko G.A., Stepanov M.V. Study of shrinkage deformations of fine-grained high-strength concrete and steel-fiber-reinforced concrete with a rational fiber content // Izvestia of higher educational institutions. Series "Technology of the textile industry". 2018. No. 3. P. 227-230.
5. Morozov N.M., Khozin V.G., Muginov Kh.G. Features of the formation of the structure of modified sandy concrete // Stroitelnye materialy. 2010. No. 9. P. 72-73.
6. Morozov N.M., Khozin V.G. Sandy concrete of high strength // Building materials. 2005. No. 11. P. 25-26.
7. Khozin V.G., Khokhryakov O.V., Nizamov R.K. Carbonate cements of low water demand - promising binders for concrete // Concrete and reinforced concrete. 2020. No. 1 (601). P. 15-28.
8. Khozin V.G., Khokhryakov O.V., Nizamov R.K., Kashapov R.R., Baishev D.I. Experience of nanomodification of cements of low water demand // Industrial and civil construction. 2018. No. 1. P. 53-57.
9. Vdovin E.A., Khozin V.G., Ilyina O.N., Kuklin A.N., Gizdatullin A.R., Sharafutdinov B.D. Experience in the use of polymer composite reinforcement in the construction of concrete airfield pavements in the airport complex in Kazan. Sat. scientific papers: Innovative materials, technologies and equipment for the construction of modern transport facilities / Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. 2013. P. 86-90.
10. Boucedra A., Bederina M., Ghernouti Y. Study of the acoustical and thermo-mechanical properties of dune and river sand concretes containing recycled plastic aggregates // Construction and Building Materials. 2020. V. 256. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119447.
11. Ouassila B., Houria H., Leila K., Mouloud B., Assia A., Chaheer R. Valorization of marble's waste as a substitute in sand concrete // Advances in Concrete Construction. 2020. No. 9 (2). P. 217-225. DOI:10.12989/acc.2020.9.2.217.
12. Thangapandi K., Anuradha R., Awoyera P. O., Gobinath R., Archana N., Berlin M., Oladimeji O. B. Durability phenomenon in manufactured sand concrete: Effects of zinc oxide and alcofine on behavior // Silicon. 2021. V. 13(4). P. 1079-1085. DOI:10.1007/s12633-020-00494-2.

13. Tolstoy A. D., Fomina E. V., Milkina A. S. Durability of fine-grained high-strength concrete in corrosive environment. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 753(3). DOI:10.1088/1757-899X/753/3/032036.
14. Peng Z., Li D., Zhou Y., Ren, S.. Failure criterion in stress space for coral reef sand concrete under biaxial compression. Wuhan Ligong Daxue Xuebao/Journal of Wuhan University of Technology. 2018. V. 40 (5). P. 66-70. DOI:10.3963/j.issn.1671-4431.2018.05.011.
15. Li Z., Wang G., Yang S., Ju G. Experimental study on mechanical properties and stress-strain constitutive relations of desert sand concrete. Yingyong Lixue Xuebao // Chinese Journal of Applied Mechanics. 2019. V. 36 (5). P. 1131-1137. DOI:10.11776/cjam.36.05.B063.
16. Li B., Yin L., Fan L. Analysis on flexural fatigue performance of manufactured sand concrete. Jianzhu Cailiao Xuebao // Journal of Building Materials. 2017. V. 20 (5). P. 801-807. DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2017.05.024.
17. Dong Z., Wu G., Xu Y. Bond and flexural behavior of sea sand concrete members reinforced with hybrid steel-composite bars presubjected to wet-dry cycles // Journal of Composites for Construction. 2017. V. 21(2). DOI:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000749.
18. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Influence of the technological properties of cement-sand mortar on the quality of 3D printed products, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 890 012082 DOI:10.1088/1757-899X/890/1/012082.
19. Mukhametrakhimov R.K., Lukmanova L.V. Structure and properties of mortar printed on a 3D printer // Magazine of Civil Engineering. 2021. V. 102(2). Article number 10206. DOI: 10.18720/MCE.10206.
20. Palagin N., Dul'miyeva A. Cost-effective design of long cylindrical shells of high-strength sand concrete, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 890 012078. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012078.
21. Palagin N., Nikitin G., Sadrutdinova A. (2022) Erection of Flat Shells of Positive Gaussian Curvature Made from High-Strength Sand Concrete and Its Economic Efficiency. In: Vatin N.I., Tamrazyan A.G., Plotnikov A.N., Leonovich S.N., Pakrastins L., Rakhmonzoda A. (eds) Advances in Construction and Development. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 197. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6593-6_11.

Информация об авторах

Николай Григорьевич Палагин, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: pal_nik11@mail.ru

Георгий Петрович Никитин, Заместитель генерального директора, главный конструктор, АО «Казанский Гипрониавиапром им. Б.И. Тихомирова», г. Казань, Российская Федерация

Email: g.nikitin@gap-rt.ru

Алексей Николаевич Трунов, Инженер ООО «Химпромпроект», г. Казань, Российская Федерация

Email: trunov@himproect.ru

Information about the authors

Nikolai G. Palagin, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: pal_nik11@mail.ru

Georgy P Nikitin Deputy General Director, Chief Designer JSC «Kazan Giproniaviaprom them. B.I. Tikhomirov», Kazan, Russian Federation

Email: g.nikitin@gap-rt.ru

Alexey N. Trunov, Engineer, ООО «Khimpromproekt» Kazan, Russian Federation

Email: trunov@himproect.ru



DOI: 10.52409/20731523_2022_1_54
УДК 625.7

Высокопрочный серощебень из карбонатных пород для устройства оснований в конструкциях дорожных одежд

А.Ю.Фомин¹, Р.Н. Аскарова², В. Г. Хозин¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

²Казанский научно-исследовательский технологический университет, г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: отсутствие карьеров высокопрочных каменных материалов на большей территории Европейской части России, и в том числе в Республике Татарстан, обуславливает поиск и применение альтернативных по свойствам материалов. Кроме того, транспортные расходы на перевозку щебня из прочных горных пород железнодорожным транспортом, в основном с территории Урала, для целей дорожного строительства, достигают 30-50 % от стоимости щебня. Поэтому эффективным альтернативным решением является технологическая обработка щебня из малопрочных пород расплавом серы, с получением нового материала – высокопрочного щебня (серощебня). Ранее серные отходы широко использовались для получения асфальтобетонных смесей, в данной работе предлагается укрепление самого заполнителя, т.е. карбонатного щебня местного происхождения. Цель исследования состоит в разработке и изучении свойств высокопрочного щебня из карбонатных пород, полученного методом его пропитки расплавом серы.

Основные результаты исследования состоят в достижении требуемых технических свойств карбонатного щебня, обработанного серой: снижении водопоглощения (в 2-16 раз), объема капиллярной пористости (в 7-11 раз), повышении гидрофобности, водостойкости, марки по дробимости (в 2-2,5 раза), истираемости и морозостойкости.

Значимость полученных результатов для дорожно-строительной отрасли состоит в обеспечении проектных технических характеристик и долговечности оснований конструкций дорожных одежд автомобильных дорог, с применением карбонатного щебня, обработанного серой, при снижении их стоимости.

Ключевые слова: строительные материалы, основание автомобильной дороги, щебень, сера, пропитка, укрепление, серощебень.

Для цитирования: Фомин А.Ю., Аскарова Р.Н., Хозин В. Г. Высокопрочный серощебень из карбонатных пород для устройства оснований в конструкциях дорожных одежд//Известия КГАСУ 2022 № 1(59). С 54-63. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_54

High-strength crushed stone from carbonate rocks for the arrangement of bases in road pavement structures.

A.Y.Fomin¹, R.N. Askarova², V.G. Khozin¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering

²Kazan National Research Technological University

Abstract: the absence of quarries of high-strength stone materials in most of the European part of Russia, including in the Republic of Tatarstan, determines the search and application of materials, which are alternative in terms of properties. In addition, transportation costs for delivering crushed stone from solid rocks by rail, mainly from the territory of the Urals, for road construction purposes, reach 30-50% of the cost of crushed stone. Therefore, an effective

alternative solution is the technological processing of crushed stone from low-strength rocks with sulfur melt, which leads to the production of a new material - high-strength crushed stone (sulfur stone). It can be said that earlier, sulfur waste was widely used to produce asphalt concrete mixtures, in this study it is proposed to strengthen the aggregate itself, i.e. carbonate crushed stone of local origin. The purpose of the study is to develop and study the properties of high-strength crushed stone from carbonate rocks obtained by impregnating it with sulfur melt. The main results of the study consist in achieving the required technical properties of carbonate crushed stone treated with sulfur: a decrease in water absorption (2-16 times), the volume of capillary porosity (7-11 times), an increase in hydrophobicity, water resistance, grade crushing (2-2.5 times), abrasion and frost resistance.

The significance of the results obtained for the road construction industry consists in ensuring the design technical characteristics and durability of the bases of road pavement structures, using carbonate crushed stone treated with sulfur, while reducing their cost.

Keywords: building materials, highway base, crushed stone, sulfur, impregnation, strengthening, sulfur stone.

For citation: Fomin A.Y., Askarova R.N., Khozin V.G. High-strength crushed stone from carbonate rocks for the arrangement of bases in road pavement structures//News KSUAE 2022 № 1(59). С 54-63. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_54

1. Введение

В настоящее время важной задачей дорожной отрасли Российской Федерации является эффективное расходование бюджетных средств при сохранении качества и темпов строительства автомобильных дорог. С ростом интенсивности транспортных потоков дорожные одежды, и, в частности, щебеночные основания автомобильных дорог в большей степени испытывают нагрузку от движущегося транспорта.

Так, например, одной из тем Форума устойчивого развития «Общее будущее» (2019г.) являлась модернизация и расширение всей транспортной инфраструктуры России, улучшение ее доступности, пространственное развитие, развитие дорожной сети и т.д. Также внимание было уделено безопасному и эффективному обращению с отходами производства и потребления и созданию современных условий для их вторичной переработки. В связи с этим, в экономических целях и для повышения качества строящихся автомобильных дорог, актуальным является применение отходов и побочных продуктов промышленности [1].

Транспортная сеть России является одной из самых протяженных в мире. Она включает в себя 1,171 млн. км автодорог с твердым покрытием, 86 тыс. км железнодорожных путей общего пользования и 34 тыс. км путей необщего пользования, 102 тыс. км водных судоходных путей, 250 тыс. км трубопроводов. В нашей стране на каждую тысячу квадратных километров приходится только 64 км дорог, из которых твердое покрытие уложено только на 70,6 %. Доля автомобильных дорог общего пользования регионального или межмуниципального значения, не отвечающих нормативным требованиям составляет 55 %, а местного значения – около 50% [2, 3].

В последнее время приоритетным направлением в дорожно-строительном материаловедении является применение укрепленных каменных материалов, грунтов, песчано-гравийных смесей. Отсутствие в Республике Татарстан высокопрочного щебня – одна из основных проблем дорожного строительства. Укрепление слабого щебня можно производить путем его пропитки расплавом технической серы [4-5]. В результате такой технологической обработки достигается низкая пористость и гидрофобизация поверхностных слоев частиц щебня, увеличивается прочность и как следствие – повышается долговечность оснований дорожных одежд, расширяется область применения такого щебня в строительной отрасли [4-7].

Техническую серу получают в результате переработки нефти, природного газа и цветных металлов в качестве побочного продукта. Полученные газообразные серные соединения, образующиеся при сублимации, отрицательным образом влияют на окружающую среду. На сегодняшний день эту проблему удалось решить с помощью инновационных технологий в области химии и технологии [8]. В связанном состоянии с

минеральными и некоторыми органическими веществами данные процессы сдерживаются, поэтому серосодержащие строительные материалы соответствуют санитарно-гигиеническим требованиям.

В строительной отрасли серу начали применять еще с конца девятнадцатого века, но из-за ее высокой стоимости на тот момент, широкого распространения технология серосодержащих материалов не получила. Сейчас в США, Канаде, Казахстане, Польше, Мексике и России производство серы превышает ее потребление, а себестоимость материалов на ее основе потенциально ниже традиционных строительных материалов (асфальтобетона, цементобетона).

В последней четверти 20-го века мировой объем производства серы в мире составлял более 10 млн. тонн в год, а количество неутилизированной серы – 25 млн. тонн [8, 9]. В период 2000-2010 г. г. года на предприятиях ТОО СП «Тенгизшевройл» (Казахстан) в среднем складировалось более 8 млн. тонн серы, что составляло чуть меньше половины мировых отвалов серы.

В России основной объем попутной серы выпускают предприятия ООО «АстраханьГазПром», ОАО «Норильский никель», ОАО «Среднеуральский медеплавильный завод», ОАО «Омский НПЗ», ОАО «БашкортостанНефтеЗавод».

В Республике Татарстан также много серообразующих предприятий. Так, «Минибаевский ГПЗ», ОАО «ТАИФ-НК» и другие мелкие нефтеперерабатывающие заводы, а также Нижнекамский ОАО «ТАНЕКО» суммарно производят более 100 тыс. тонн серы в год.

Учитывая мировые мощности предприятий, прогнозируемый объем запасов серы, к 2030 году составит 58 млн. тонн [10-12]. Следовательно, уже сегодня существует проблема вторичной переработки серы как с экономической, так и с экологической точек зрения.

Научные исследования в области свойств элементной серы и ее практического применения ведутся в большинстве стран мира. Основным материалом, нашедшим широкое применение, является сероасфальтобетон [4-7], обладающий большими прочностными характеристиками и сдвигустойчивостью. Сероасфальтобетон в разное время применяли в ряде стран: США, Канаде, Чехии, Франции, Польше. Широкого распространения технология не получила ввиду санитарно-гигиенического несовершенства производства смеси и ее укладки в покрытие. Однако в отверженном состоянии сероасфальтобетон экологически безопасен.

Вторым наиболее исследованным материалом является серный бетон (серобетон). О возможности его получения было известно еще с XVII века, но более подробно он был изучен в 70-х годах XX века в США. По сравнению с материалами на основе портландцемента у серобетона более низкие показатели водопоглощения и водонепроницаемости, высокая химическая стойкость, сопротивление к воздействию окружающей среды и морозостойкость [13-15]. Многие работы в этой области основаны на результатах теоретических и экспериментальных исследований ученых Богуславского А.М., Волкова М.И., Гезенцева Л.Б., Горелышева Н.В., Калгина Ю.И., Ковалева Я.Н., Колбановской А.С., Королева И.В., Котлярского Э.В., Печеного Б.Г., Ребиндера П.А., Руденского А. В., Рыбьева И.А., Сахарова П.В., Волгушева А.Н., Патуроева В.В., Орловского Ю.И. и др.

Еще одним из эффективных способов применения серы является ее использование в качестве модификатора свойств строительных материалов и изделий, которое заключается в придании им новых улучшенных качеств (гидрофобности, снижение объемной пористости). Таким образом могут обрабатываться древесина, керамика, плотные и ячеистые бетоны с целью упрочнения (усиления) и повышения их долговечности. Результаты данных работ опубликованы в трудах Волгушева А.Н., Патуроева В.В. и др. [16-17] К группе подобных материалов относятся каменные материалы из карбонатных пород, применяемые в широком спектре строительных и строительно-отделочных работ и производстве минеральных вяжущих.

Анализ состояния минерально-сырьевой базы Республике Татарстан показал, что на ее территории имеется 340 месторождений карбонатных пород, 66 из которых учитываются балансами строительного и пильного камня, сырья для производства извести, магнезиальных вяжущих и известняковой муки (в том числе 7 объектов проходят по двум балансам). Также сравнительный анализ физико-химического состава пород показал их

неоднородность по прочности и плотности и минералогическому составу. Так, плотность может варьироваться от 1570 до 2710 кг/м³, а прочность при сжатии от 10 до 100 МПа. При этом среднее значение прочности при сжатии в цилиндре не превышает 400 кгс/см², а содержание оксидов Mg(CO)₃ отличается на десятки процентов в пределах одного месторождения [18-21]. По данным геологических фондов «ЦНИИГеолнеруд» в массе пород осадочного происхождения преобладают карбонатные породы – известняки и доломиты различных типов:

- кальцит-доломитовый подтип, месторождения данного подтипа представлены доломитами и известковыми доломитами;
- доломит-кальцитовый подтип, эти породы большей частью сложены доломитовыми известняками;
- кальцитовый подтип, большинство месторождений карбонатных пород РТ входят в этот подтип.

Эти породы представлены доломитистыми известняками.

Наибольшее количество месторождений, включая мелкие, находятся в Альметьевском, Высокогорском и Лениногорском районах. Отсутствуют месторождения карбонатных пород в Западном Закамье (Аксубаевский, Алексеевский, Альшеевский, Октябрьский районы) и на востоке республики (Актанышский, Мензелинский районы).

Согласно данным, опубликованным в «Концепции стратегии развития капитального строительства РТ до 2030 года» [8], Татарстан располагает следующими запасами минерального карбонатного сырья для различных производств: щебня – 178137,6 тыс. м³, пиленного камня – 15039 тыс. м³, декоративно-отделочного камня – 823,5 тыс. м³, известковых вяжущих – 68532,5 тыс. т, магнезиальных вяжущих – 3647,5 тыс. т, мелиорантов почв – 101882,8 тыс. т. Это свидетельствует о возможности самообеспечения республики сырьем для производства высокопрочного щебня.

Основным видом строительной продукции, производимой из карбонатных пород, является щебень в виде фракций: 20-40, 40-60, 60-80 мм. Основной областью его применения является дорожное строительство. При этом согласно требованию СП 34.13330.2012 и дорожно-строительной классификации, карбонатный низкомарочный щебень можно применять только для устройства оснований в конструкциях дорожных одежд автомобильных дорог низких категорий. Также карбонатный щебень можно применять в легких и крупнопористых бетонах в качестве заполнителя и в производстве минерального порошка для асфальтобетонных смесей. То есть низкомарочный щебень, в целом малоприменим для целей дорожного строительства, а также для производства цементных бетонов. При этом его эффективно применять в производстве органоминеральных смесей, укрепленных органическими или минеральными вяжущими, а также после обработки битумом (черный) щебень или битумной эмульсией; при устройстве оснований, построенных по способу пропитки или полупропитки. Метод пропитки щебня растворами лигносульфонатов позволяет достичь более высокой марки щебня, но недостатком процесса является его длительность, около 12 часов. В основе данных методов лежит принцип снижения объема капиллярной пористости материала для придания ему большей водостойкости и морозостойкости.

Метод повышения прочности карбонатного щебня имеет определенные преимущества перед другими способами обработки. Так, технология «черного щебня» или способ обработки методом насыщения сверхкритическим флюидом (пропитка битумом и нефтью) обеспечивает снижение водопоглощения щебня в два раза при максимальной прочности в 600 кгс/мм², а предлагаемый нами метод снижает водопоглощение в среднем на 70 % при увеличении прочности в 2-4 раза. Пропитка же серным расплавом занимает около 5-15 мин, в зависимости от структуры и объема порового пространства щебня. Отличительной чертой взаимодействия карбонатного щебня с расплавленной серой является их интенсивное взаимодействие вследствие низкой вязкости расплава серы в сравнении, например, с расплавом битума (в 2-2 раза), в результате которого молекулы серы проникают в мельчайшие поры осадочной породы, обеспечивая высокую адгезию между собой. Благодаря явлению капиллярного всасывания обеспечивается заполнение порового пространства серой до глубоких слоев породы.

В условиях нынешней экономики и строительной политики, актуальным является использование местного сырья для уменьшения цены готового продукта, а также

применение отвалов серы республиканских нефтеперерабатывающих предприятий с целью монетизации отходов и качественного улучшения свойств материалов. В связи с этим целью работы является разработка метода пропитки карбонатного щебня расплавом серы с целью его гидрофобизации и упрочнения и изучение свойств полученного высокопрочного щебня.

Задачами исследования являются разработка метода пропитки карбонатного щебня расплавом серы, исследование физико-механические свойства серощебня, его структуры, а также свойств поверхности. С учетом полученных результатов и свойств серощебня необходимо определение области его применения в дорожном строительстве.

2. Материалы и методы

Для получения серощебня использовались техническая сера и малопрочный карбонатный щебень:

— щебень из осадочных горных пород марки М400, соответствующий ГОСТ 8267-93. Щебень фракции 5-20 отобран в карьерах с. Альдермыш, с. Атна и д. Татарское Ходяшево (Республика Татарстан).

— сера техническая S8, ГОСТ 127.1-93. Продукт газоочистки предприятия «Татнефтегазпереработка» ОАО «Татнефть» (г. Альметьевск). Порошок желтого цвета. Температура плавления $T_{пл} = 112,8$ °С, температура воспламенения $T_{восп.} = 261$ °С, относительная плотность $d^{20} = 1,96$ кг/м³;

Приготовление образцов обработанного щебня осуществлялось в следующей последовательности. Сначала промытый мокрый щебень сушили в сушильном шкафу при температуре 100-110 °С до постоянной массы, в течение 1-2 ч., в зависимости от исходной влажности щебня. Затем в сушильном шкафу, оборудованном вытяжной вентиляцией расплавляли серу в лабораторной эмалированной кювете, при температуре 120-130 °С. Далее просушенный горячий щебень раскладывали в один слой на дно посуды так, чтобы он полностью погрузился в расплав серы. Кювету помещали снова в сушильный шкаф и выдерживали 10-15 минут, при температуре 155 °С для активации диффузионных процессов, поскольку при данной температуре расплав серы имеет минимальную вязкость, при которой он равномерно распределяется по поверхности щебня и максимально проникает в поры породы. Остаток серы не вступивший во взаимодействие со щебнем сливали в отдельную тару. Затем обработанный щебень охлаждали при комнатной температуре в воздушно-сухих условиях. Процесс получения серощебня в лабораторных условиях занимает около двух-трех часов, включая сушку и нагрев щебня, приготовление расплава серы, пропитку и охлаждение готового серощебня.

Сравнительные испытания контрольных образцов щебня и серощебня на марку по дробимости, количество зерен пластинчатой (лещадной) и игольчатой форм, содержание пылевидных и глинистых частиц, водопоглощение и пористость проводились в соответствии с методиками, указанными в ГОСТ 8269.0-97.

3. Результаты

В ходе лабораторных испытаний получены основные значения показателей свойств серощебня: водопоглощение, пористость, марка по дробимости и истираемости, установлены процентное содержание зерен пластинчатой формы и пылевидных частиц в образцах до обработки и после пропитки их расплавом серы.

В таблицах 1-3 приведены сравнительные показатели физико-механических свойств исходного и обработанного серой щебня карьеров с. Чепчуги, д. Татарское Ходяшево, с. Атна Республики Татарстан

Таблица 1

Сравнительные показатели физико-механических свойств щебня карьера в с. Чепчуги Республики Татарстан

№ п/п	Наименование показателя	Значение показателя	
		до обработки серой	после обработки серой
1	Содержание в % по массе: – зёрен пластинчатой (лещадной) формы – пылевидных и глинистых частиц	7-13 % 2,3 %	до 1,2 % не наблюдается
2	Марка по дробимости	М 400	М 1000
3	Марка по истираемости	И2-И3	И3-И4
4	Водопоглощение, %	5-8 %	0,5-1,3 %
5	Пористость, %	8,7-21,4 %	3,3 %

Таблица 2

Сравнительные показатели физико-механических свойств щебня карьера в д. Татарское Ходяшево Республики Татарстан

№ п/п	Наименование показателя	Значение показателя	
		до обработки серой	после обработки серой
1	Содержание в % по массе: – зёрен пластинчатой (лещадной) формы – пылевидных и глинистых частиц	27,5 % 1,5 %	не изменилась не наблюдается
2	Марка по дробимости	М 400	М 600
3	Марка по истираемости	И3	И3
4	Водопоглощение, %	4,7 %	1,8 %
5	Пористость, %	11 %	1 %

Таблица 3

Сравнительные показатели физико-механических свойств щебня карьера в с. Атна Республики Татарстан

№ п/п	Наименование показателя	Значение показателя	
		до обработки серой	после обработки серой
1	Содержание в % по массе: – зёрен пластинчатой (лещадной) формы – пылевидных и глинистых частиц	3-26,5 % 12,3 %	до 4 % не наблюдается
2	Марка по дробимости	М 300	М 600
3	Марка по истираемости	И3	И3
4	Водопоглощение, %	7,5-10 %	2,9 %
5	Пористость, %	21 %	3 %

4. Обсуждение и описание результатов

Как видно из данных, приведенных в таблицах 1-3, исходный карбонатный щебень обладает достаточно высокой пористостью, большим количеством пылевидных и глинистых частиц. Обработанный щебень полностью лишен пылевидных и глинистых частиц в связи с предварительной промывкой, а лещадность с карьеров с. Атна и с. Чепчуги значительно снижается в пределах от 6 до 10 раз. Марка по истираемости незначительно выросла лишь во втором случае, что говорит о том, что пропитка щебня расплавом серы практически не влияет на данное свойство.

Показатель водопоглощения обработанного щебня в среднем снижается в 6,3 раза в зависимости от месторождения в связи с отличительными особенностями их минерального состава. Образующийся в результате пропитки известнякового щебня расплавом серы градиентный приповерхностный слой с более плотной структурой препятствует проникновению воды в поровое пространство и обеспечивает его надежное капсулирование.

Пористость – еще один важный показатель, который в среднем снижается в 6,7 раз в следствии пропитки щебня расплавленной серой. Значительное снижение пористости закономерно может привести к увеличению морозостойкости щебня, что увеличит срок эксплуатации данного материала.

Процесс проникновения жидкого расплава серы в поры карбонатного щебня увеличивает его плотность. При изменении плотности щебня на 10-11 %, в разы изменяется его прочностные показатели, такие как марка по дробимости. Так, исходный щебень карьера Чепчуги имеет марку по дробимости М400 до обработки и М1000 после. Наименьший прирост прочности с 400 до 600 наблюдается у щебня месторождения Татарское Ходяшево, что по-видимому обусловлено затруднением проникновения расплава серы в объем обрабатываемого материала в связи с особенностями размеров и строения пор в щебне данного месторождения.

5. Заключение

1. Разработан и освоен метод пропитки местного карбонатного щебня жидким расплавом серы в лабораторных условиях.
2. Исследованы физико- механические свойства полученного серощебня. Показано, что в результате обработки щебня расплавом серы, достигается увеличение его марки по дробимости, что объясняется повышением плотности материала на 10-11 % за счет заполнения пор, при этом лещадность снижается от 6 до 10 раз.
3. Разработанный метод обработки снижает пористость щебня, а благодаря ярко выраженным гидрофобным свойствам поверхности, серощебень имеет выраженную сопротивляемость к воздействию воды.
4. Из анализа полученных результатов и их сравнения с требованиями ГОСТ 8267-93 и ГОСТ 9128-2013, следует, что полученный материал может применяться в сфере дорожного строительства для устройства оснований автомобильных дорог и производстве асфальтобетона.

Список литературы

1. Международный Форум устойчивого развития «Общее будущее»// общеебудущее.рф : сайт ежегодного Международного форума устойчивого развития. 2019 URL: <https://xn--90aajcasa9d6bb4dg.xn--p1ai/> (дата обращения: 02.10.2020).
2. Обзор российского транспортного сектора в 2019 году // kmpg.ru: сайт РФПИ 2020 URL: <https://ru.investinrussia.com/data/file/ru-ru-russian-transport-survey.pdf> (дата обращения 02.10.2020).
3. Экономика России, цифры и факты. Часть 3 Транспорт // <https://unitedtraders.com:сайт компании ООО «ИЦ Юнайтед Трейдерс» 2015 URL: https://utmagazine.ru/posts/10280-ekonomika-rossii-cifry-i-fakty-chast-3-transport> (дата обращения 02.10.2020)
4. Фомин А. Ю., Хозин В. Г. Новые серосодержащие материалы для дорожного строительства // Строительные материалы. 2016. № 12. С. 80–82.
5. Вдовин Е. А., Фомин А. Ю., Хафизов Э. Р. Effective stone mastic asphalt with the use of stabilizing additives of multifunctional action // Инженерно-строительный журнал. 2019. № 8. С. 154-161.
6. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Низамов Р.К. Карбонатные цементы низкой водопотребности - перспективные вяжущие для бетонов // Бетон и железобетон. 2020. № 1 (601). С. 15-28.
7. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Influence of the technological properties of cement-sand mortar on the quality of 3D printed products: сб. Ст. IOP Conference series: Materials Science and Engineering. Kazan, Russia, 2020. С. 012082.
8. Анисимов В. Н., Булгаков И. С., Гасиев Г. К. Решение геоэкологических проблем безопасности и глубокой переработки природно-техногенных месторождений // Горная промышленность 2012. № 6. С. 64-68.
9. Гарифуллин Р. Г., Фахрутдинов Р. З., Гарифуллин А. Р. История утилизации попутного нефтяного газа в Татарстане // Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 13. С. 314-317.
10. Бадикова, А. Д. Разработка комплексных технологий переработки серосодержащих отходов нефтеперерабатывающих производств с получением целевых

продуктов: специальность 05.17.07 "Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ": автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Бадикова Альбина Дарисовна. – Уфа, 2013. – 42 с.

11. Senibabnov S. A., Andrianov K. A., Zubkov A. F. Method of development of technology for the device of road structures using asphalt granulate // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2020. № 2 (46). С. 51-70.

12. Solovieva V., Stepanova I., Soloviev D. High-strength concrete with improved deformation characteristics for road surfaces // Lecture notes in civil engineering. 2020. № 50. С. 339-345. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9-35.

13. Tuan H. Le., Inozemtcev S., Korolev E., Grishina A. The efficiency of sulfur modifier to neutralize toxic gases in sulfur-asphalt concrete technology: dig. of art. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. С. 032016. DOI: 10.1088/1757-899X/869/3/032016.

14. Sakib N., Bhasin A., Islam M. K., Khan K., Khan M. I. A review of the evolution of technologies to use sulphur as a pavement construction material // International Journal of Pavement Engineering. 2019. DOI: 10.1080/10298436.2019.1612064.

15. Irkinovich K.I., Umaraliyevich K.I., Urmonjonovich A.A. Improvement of asphalt concrete shear resistance with the use of a structure-forming additive and polymer // International Journal of Scientific and Technology Research. 2019. Т. 8. № 11. С. 1361-1363. DOI: 10.1088/1757-899X/775/1/012124.

16. Авторское свидетельство № 1393824 А1 СССР, МПК C04B 28/36. Композиция для изготовления строительных изделий и конструкций: № 4099230: заявл. 05.08.1986: опубл. 07.05.1988 / В. В. Патуроев, А. Н. Волгушев, Н. Ф. Шестеркина, В. А. Еремина; заявитель Научно-исследовательский институт бетона и железобетона Госстроя СССР.

17. Шаяхмедов Р.И., Утегенов Б.Б. К вопросу о долговечности серного асфальтобетона, или предварительная оценка увеличения срока службы дорожного полотна при замене асфальта на сероасфальт // Перспективы развития строительного комплекса. 2013. Т. 1. С. 23-28.

18. Mavliev L., Bulanov P., Vdovin E., Zaharov V., Gimazov A. Road soil cement with complex additives based on organosilicon compounds and electrolytes // ZKG International. 2016. Т. 69. № 9. С. 49-54.

19. Durability of Concrete with Man-made Thermoplastic Sulfur Additive / A. Gumeniuk, R. Hela, I. Polyanskikh [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : XXIII International Scientific Conference on Advance in Civil Engineering: "CONSTRUCTION - THE FORMATION OF LIVING ENVIRONMENT" (FORM-2020), Hanoi, Vietnam, 23–26 сентября 2020 года. – Hanoi, Vietnam: IOP Publishing Ltd, 2020. – P. 032012. DOI 10.1088/1757-899X/869/3/032012.

20. A critical review on the properties and applications of sulfur-based concrete / R. Fediuk, Y. H. Mugahed Amran, M. A. Mosaberpanah [et al.] // Materials. – 2020. – Vol. 13. – No 21. – P. 1-23. DOI 10.3390/ma13214712.

21. Properties of sulfur-extended asphalt concrete / V. A. Gladkikh, E. V. Korolev, D. Husid, I. Sukhachev // MATEC Web of Conferences : 5th International Scientific Conference on Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education, IPICSE 2016, Moscow, 16–17 октября 2016 года. – Moscow: EDP Sciences, 2016. – P. 04024. DOI 10.1051/mateconf/20168604024.

References

1. International Forum of Sustainable Development "Common future"/general future.RF : website of the annual International Forum for Sustainable Development. 2019 URL: <https://xn--90aajcaca9d6bb4dg.xn--p1ai/> (accessed: 02.10.2020).

2. Overview of the Russian transport sector in 2019 // kmpg.ru: RFPI 2020 website URL: <https://ru.investinrussia.com/data/file/ru-ru-russian-transport-survey.pdf> (accessed 02.10.2020).

3. The Russian economy, figures and facts. Part 3 Transport // <https://unitedtraders.com/>: website of IC United Traders LLC 2015 URL: <https://utmagazine.ru/posts/10280-ekonomika-rossii-cifry-i-fakty-chast-3-transport> (accessed 02.10.2020)

4. Fomin A. Yu., Khozin V. G. New sulfur-containing materials for road construction // Building materials. 2016. No. 12. pp. 80-82.

5. Vdovin E. A., Fomin A. Yu., Hafizov E. R. Effective stone mastic asphalt with the use of stabilizing additives of multifunctional action // *Civil Engineering magazine*. 2019. No. 8. pp. 154-161.
6. Khozin V.G., Khokhryakov O.V., Nizamov R.K. Carbonate cements of low water demand - promising binders for concrete // *Concrete and reinforced concrete*. 2020. No. 1 (601). pp. 15-28.
7. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Influence of the technological properties of cement-sand mortar on the quality of 3D printed products: Sat. St. IOP Conference series: Materials Science and Engineering. Kazan, Russia, 2020. p. 012082.
8. Anisimov V. N., Bulgakov I. S., Gasiev G. K. The solution of geoecological problems of safety and deep processing of natural and man-made deposits // *Mining industry* 2012. No. 6. pp. 64-68.
9. Garifullin R. G., Fakhrutdinov R. Z., Garifullin A. R. The history of utilization of associated petroleum gas in Tatarstan // *Vestnik Kazan Technological University*. 2014. No. 13. pp. 314-317.
10. Badikova, A.D. Development of complex technologies for processing sulfur-containing waste from oil refining industries with the production of target products: specialty 05.17.07 "Chemical technology of fuel and high-energy substances": abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Badikova Albina Darisovna. - Ufa, 2013. -42 p.
11. Senibabnov S. A., Andrianov K. A., Zubkov A. F. Method of developing technology for the construction of road structures using asphalt concrete granulate // *Russian Journal of Construction and Architecture*. 2020. No. 2 (46). pp. 51-70.
12. Solovyova V., Stepanova I., Solovyov D. High-strength concrete with improved deformation characteristics for road surfaces // *Lecture notes on civil engineering*. 2020. No. 50. pp. 339-345. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9-35.
13. Tuan H. L., Inozemtsev S., Korolev E., Grishina A. The effectiveness of a sulfur modifier for neutralizing toxic gases in the technology of sulfur asphalt concrete: dig. art. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. p. 032016. DOI: 10.1088/1757-899X/869/3/032016
14. Sakib N., Bhasin A., Islam M. K., Khan K., Khan M. I. Review of the evolution of technologies for the use of sulfur as a building material for pavement // *International Journal of Road Construction Machinery*. 2019. DOI: 10.1080/10298436.2019.1612064.
15. Irkinovich K.I., Umaralievich K.I., Urmonjonovich A.A. Increasing the resistance of asphalt concrete to shear using a structure-forming additive and polymer // *International Journal of Scientific and Technological Research*. 2019. № 8. № 11. № 1361-1363. DOI: 10.1088/1757-899X/775/1/012124.
16. Copyright certificate No. 1393824 A1 USSR, IPC C04B 28/36. Composition for the manufacture of building products and structures: No. 4099230: application. 05.08.1986 : publ. 07.05.1988 / V. V. Paturoev, A. N. Volgushev, N. F. Shesterkina, V. A. Eremina ; applicant Scientific Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete Gosstroy USSR.
17. Shayakhmedov R.I., Utegenov B.B. On the question of the durability of sulfur asphalt concrete, or a preliminary assessment of the increase in the service life of the roadway when replacing asphalt with gray asphalt // *Prospects for the development of the construction complex*. 2013. Vol. 1. pp. 23-28.
18. Mavliev L., Bulanov P., Vdovin E., Zakharov V., Gimazov A. Cement for road soil with complex additives based on organosilicon compounds and electrolytes // *ZKG International*. 2016. No. 69. No. 9. pp. 49-54.
19. Durability of concrete with the addition of artificial thermoplastic sulfur / A. Gumenyuk, R. Hela, I. Polyanskikh [et al.] // IOP conference series: Materials Science and Engineering: XXIII International Scientific Conference on the Development of Civil Engineering: "CONSTRUCTION - FORMATION OF HABITAT" (FORM 2020), Hanoi, Vietnam, June 23-26, 2020. - Hanoi, Vietnam: IOP Publishing Ltd, 2020. - p. 032012. DOI 10.1088/1757-899X/869/3/032012.
20. A critical review of the properties and applications of sulfur-based concrete / R. Fedjuk, Y. H. Mugahed Amran, M. A. Mosaberpana [et al.] // *Materials*. - 2020. - Vol. 13. - No. 21. - pp. 1-23. DOI 10.3390/ma13214712.

21. Properties of asphalt concrete with the addition of sulfur / V. A. Gladkikh, E. V. Korolev, D. Khusid, I. Sukhachev // MATEC Web of Conferences : 5th International Scientific Conference on Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education, IPICSE 2016, Moscow, November 16-17, 2016. - М.: EDP Sciences, 2016. - p. 04024. DOI 10.1051/mateconf/20168604024.

Информация об авторах

Алексей Юрьевич Фомин, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: fomin-al.78@mail.ru

Рушания Наилевна Аскарова, аспирант, Казанский научно-исследовательский технологический университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: ryshka08@gmail.com

Вадим Григорьевич Хозин, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: khozin.vadim@yandex.ru

Information about the authors

Aleksey Y. Fomin candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: fomin-al.78@mail.ru

Rushaniya N. Askarova, postgraduate student, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation

E-mail: ryshka08@gmail.com

Vadim G. Khozin, PhD in technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: khozin.vadim@yandex.ru



DOI: 10.52409/20731523_2022_1_64
УДК 69.05, 691.3

Технология и контроль качества строительной 3D-печати

Р.Х. Мухаметрахимов¹, Л.В. Зиганшина¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: Несовершенство строительной продукции, получаемой методом послойной экструзии, выражающееся в образовании дефектов и отклонений, одной из причин которых является отсутствие системы контроля качества строительной 3D-печати обуславливает актуальность решаемой проблемы. Цель исследований – разработать состав операций и средства контроля при аддитивном производстве строительной продукции методом послойной экструзии (3D-печати).

Результаты. Исследовано влияние особенностей подготовки цифровой модели, реотехнологических характеристик смеси (подвижности и предельного напряжения сдвига) на качество строительной продукции, напечатанной на 3D-принтере. Для получения изделий на 3D-принтере с требуемой длиной необходимо учитывать особенности при формировании G-code трехмерной цифровой модели: удлинения образца на величину, вызванного растеканием сырьевой смеси, а также удлинение образца на величину расстояния от центра тяжести выдавливаемой сырьевой смеси до ее грани в начальном и конечном положениях сопла. Для малоподвижных смесей характерно преимущественно образование дефектов в виде нарушения геометрии, прямолинейности, разрывов между слоями и по длине слоя, разнотолщинности при отсутствии расплыва. Более подвижные смеси отличаются большей степенью образования дефектов в виде нарушения геометрии, прямолинейности, разнотолщинности, расплыва, однако дефекты в виде разрывов между слоями и по длине слоя – отсутствуют. Зависимость геометрических отклонений длины печатаемого изделия, представляющего собой многослойные полосы, от предельного напряжения сдвига смеси, при постоянных режимах 3D-печати, выражается линейной функцией $\Delta l = -0,5276 \cdot \tau_0 + 168,31$. На основе выявленных особенностей аддитивного производства методом послойной экструзии предложены основные положения организации и осуществления контроля качества методом 3D-печати, устанавливающие состав операций и средства контроля при производстве работ.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в снижении образования дефектов получаемой продукции методом послойной экструзии (3D-печати) за счет совершенствования системы контроля качества при аддитивном производстве с учетом влияния особенностей моделирования цифровой модели изделия, реотехнологических характеристик смеси, а также состава операций и средств контроля при входном, операционном и приемочном контроле.

Ключевые слова: бетоны, растворы, реология, 3D-печать, 3DCP, аддитивные технологии, технология и организация строительства, контроль качества.

Для цитирования: Мухаметрахимов Р.Х., Зиганшина Л.В. Технология и контроль качества строительной 3D-печати//Известия КГАСУ 2022 № 1(59). С 64-79.

DOI: 10.52409/20731523_2022_1_64

Technology and quality control of 3DCP

R. Kh. Mukhametrakhimov¹, L.V. Ziganshina¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering

Abstract: Relevance of the problem being solved is caused by the imperfection of 3DCP products, which is expressed in the formation of defects and deviations, one of the reasons for which is the lack of a quality control system for 3DCP. The purpose of the research is to develop the composition of operations and control tools for the additive manufacturing (3DCP).

The influence of the features of CAD-model preparation, rheological and technological characteristics of the mixture (mobility and yield strength) on the quality of construction products printed on a 3D printer has been studied. It is necessary to take into account the features in the formation of the G-code of a CAD-model to obtain products on a 3D printer with the required length: elongation of the sample by an amount caused by the spreading of the raw mixture, as well as elongation of the sample by the distance from the center of gravity of the extruded raw mixture to its face in the initial and end positions of the nozzle. Nonmobile mixtures are characterized mainly by the formation of defects as a violation of geometry, straightness, gaps between layers and along the length of the layer, thickness differences, and the absence of spread. More mobile mixtures are characterized by a greater degree of formation of defects as geometry violations, straightness, thickness variation, flow, however, there are no defects as gaps between layers and along the length of the layer. The dependence of the geometric deviations of the length of printed sample, which is a multilayer strip, on the limiting shear stress of the mixture, under constant 3D printing modes, is expressed by a linear function $\Delta l = -0,5276 \cdot \tau_0 + 168,31$. Based on the identified features of 3DCP, the main provisions for the organization and implementation of quality control of 3DCP are proposed, which establish the composition of operations and means of control during the work performance.

Significance of the obtained results for the construction industry consists in reducing the defects in 3DCP products by improving the quality control system in additive manufacturing, taking into account the influence of the features of CAD-modeling, rheological and technological characteristics of the mixture, as well as the composition of operations and control tools during incoming, operational and acceptance control.

Keywords: concrete, rheology, 3D printing, 3DCP, additive technologies, construction technology and management, quality control.

For citation: Mukhametrakhimov R. Kh., Ziganshina L.V. Technology and quality control of 3DCP//News KSUAE 2022 № 1(59). С 64-79. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_64

1. Введение

В различных отраслях промышленности, в том числе строительстве, наблюдается широкое применение инновационных технологий в направлении развития и внедрения средств автоматизации и роботизации при производстве [1–3].

Одной из таких активно развивающихся инновационных технологий в области строительства является применение аддитивных технологических процессов, позволяющих изготавливать детали, изделия, конструкции, каркасы зданий и сооружений на основе создания физического объекта по электронной геометрической модели путем добавления материала, как правило, слой за слоем, в отличие от вычитающего (субтрактивного) производства (механической обработки) и традиционного формообразующего производства (литья, штамповки) [4].

Перспективы превосходства аддитивных технологий в строительной отрасли по отношению к традиционным подходам отмечают многие авторы в своих работах [5–14] благодаря значительному сокращению сроков строительства и трудозатрат, возможности изготовления изделий различной конфигурации, отсутствию существенных отходов при

производстве, экономической выгоде, обеспечению сохранности окружающей среды и повышению безопасности жизнедеятельности в процессе самого производства.

Исследования в данной области реализуются в различных научных школах, основными из которых являются НИУ МГСУ [15–17], БГТУ им. В.Г. Шухова [3,18–20], ВГТУ [21–23], КГАСУ [24–26] и др.

Согласно ГОСТ 57590-2017 [27] выделяется семь основных категорий аддитивных процессов (фотополимеризация в ванне, струйное нанесение материала, струйное нанесение связующего, синтез на подложке, экструзия материала, прямой подвод энергии и материала и листовая ламинация). Наиболее широкое распространение в строительстве получил метод послойной экструзии материала с применением сырьевых смесей на основе минеральных вяжущих, главным образом, портландцемента [12,28–34].

Технология формования бетонов методом послойной экструзии это взаимосвязанные процессы и способы переработки сырьевых компонентов. Основными элементами технологии являются сырье, энергия и аппаратура (оборудование), которые тесно взаимосвязаны и обусловлены экономическими и научно-техническими аспектами [35].

Опираясь на работы В.И. Теличенко, О.М. Терентьева, А.А. Лapidуса [36] можно сформулировать, что технология аддитивного строительного производства с научной точки зрения рассматривает теоретические основы, способы и методы выполнения строительных процессов, обеспечивающих обработку полуфабрикатов (растворных и бетонных смесей) с качественным изменением их состояния, физико-механических свойств, геометрических размеров с целью получения продукции требуемого качества.

Несмотря на ряд работ, свидетельствующих о существенном расширении областей применения аддитивного производства в строительстве, следует отметить, что строительная продукция характеризуется дефектами и отклонениями, выражающимися в растекании смеси, наличии разрывов, изломов, пустот, пониженной трещиностойкости и др. [25,31,37–39], одной из причин которых является несовершенство системы контроля качества при 3D-печати.

При этом стоит отметить, что некоторые требования к методам контроля качества изделий, полученных в технологиях аддитивного производства (в т.ч. методом строительной 3D-печати) изложены в [40], однако данные требования носят общий характер, а область применения норматива распространяется на широкий спектр существующих технологий аддитивного производства, не учитывая технологические особенности каждого из них.

Таким образом, особую актуальность приобретают работы, направленные на изучение особенностей технологии производства и контроля качества работ при аддитивном производстве строительной продукции методом послойной экструзии (3D-печати).

Цель работы – разработать состав операций и средства контроля при аддитивном производстве строительной продукции методом послойной экструзии (3D-печати).

Для это необходимо решить следующие задачи:

- исследовать влияние подвижности сырьевой смеси на качество строительной продукции, получаемой методом послойной экструзии (3D-печати);
- определить особенности формирования G-code трехмерной цифровой модели и растекания смеси в процессе экструзии на геометрические отклонения затвердевших композитов;
- установить зависимости геометрических отклонений длины печатаемого изделия, представляющего собой многослойные полосы, от предельного напряжения сдвига смеси, при постоянных режимах 3D-печати;
- разработать основные положения организации и осуществления контроля качества при возведении строительной продукции методом 3D-печати, устанавливающие состав операций и средства контроля при производстве работ.

Объект исследований – процессы аддитивного строительного производства.

Предмет исследований – контролируемые операции, методы, объем и средства контроля аддитивного строительного производства.

2. Материалы и методы

Исследования выполнялись в лаборатории аддитивных технологий строительного производства в ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет».

При создании строительной продукции методом послойной экструзии (3D-печати) осуществляли следующую последовательность технологических операций:

1. Создание цифровой трёхмерной модели объекта;
2. Деление модели на слои в поперечном сечении;
3. Перевод модели в цифровые данные на языке программирования G-code, позволяющем моделировать, формировать коды и управлять 3D-принтером;
4. Приготовление сырьевой смеси с заданными свойствами, и ее подача в съёмный накопительный бункер строительного 3D-принтера;
5. Передача разработанного кода на печатающую головку-экструдер;
6. Послойная экструзия сырьевой смеси в соответствии с заданной цифровой трёхмерной моделью;
7. Отверждение материала до завершения формирования объекта (изделия);
8. Постобработка: удаление поддерживающей структуры (при необходимости).

Для 3D-печати использовали сырьевую смесь, включающую следующие исходные компоненты:

а) портландцемент: ЦЕМ I 42,5 Н производства филиала «Сулоложскцемент» (холдинг SLK Cement) по ГОСТ 31108-2016;

б) мелкий заполнитель: кварцевый песок с модулем крупности $M_k = 2,3$ по ГОСТ 8736-2014;

в) водопроводная питьевая вода, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732-2011.

Перемешивание компонентов сырьевой смеси производили в бетоносмесителе принудительного действия в течение 10 минут до получения однородной массы.

Подвижность смеси определялась в соответствии с требованиями ГОСТ 5802-86 по глубине погружения в нее эталонного конуса.

Предельное напряжение сдвига смеси определялось на границе гравитационной растекаемости при помощи простейшего вискозиметра, представляющего собой полый цилиндр из полипропилена высотой 200 мм, внутренним диаметром 105 мм, в соответствии с методикой [41].

3D-печать образцов из сырьевой смеси осуществлялось методом послойной экструзии на порталном цеховом строительном 3D-принтере «АМТ S-6044» (ООО «СПЕЦАВИА», г. Ярославль), посредством ее печати по заранее разработанной трёхмерной цифровой модели (G-code).

Напечатанные образцы твердели в течение 28 суток в естественных условиях при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, относительной влажности воздуха $(50 \pm 20)\%$.

Контроль качества напечатанного на 3D-принтере изделия включал в себя визуальный и измерительный методы. Измерительный контроль произведен с использованием металлической линейки по ГОСТ 427-75, металлической рулетки по ГОСТ 7502-98 и увеличительной лупы по ГОСТ 25706-83.

3. Результаты и обсуждение

Создаваемая продукция на строительном 3D-принтере должна соответствовать предъявляемым к ней требованиям проектной и нормативной документации, отступление от которых может привести к получению некачественных изделий с различными дефектами, одной из причин которых может являться не оптимальность подобранных составов бетонных смесей и технологических параметров (подвижности).

В этой связи на первом этапе изучена роль подготовки цифровой модели, а также влияние подвижности и предельного напряжения сдвига смеси на качество строительной продукции, напечатанной на 3D-принтере.

Исследовано качество напечатанных на 3D-принтере изделий трех составов, отличающихся подвижностью: состав № 1 – с чрезмерной подвижностью и низким значением предельного напряжения сдвига, состав № 2 – с недостаточной подвижностью и высоким значением предельного напряжения сдвига, состав № 3 – с подвижностью и

предельным напряжением сдвига, близкими к оптимальным значениям. Результаты контроля напечатанной на 3D-принтере скамейки приведены на рис. 1, в таблице 1.

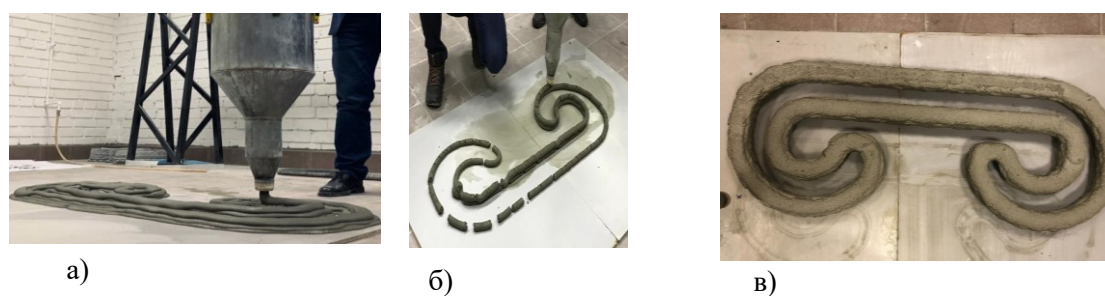


Рис. 1. 3D-печать изделия сырьевыми смесями с различной подвижностью: а – смесь состава №1; б – смесь состава №2; в – смесь состава №3 (иллюстрация авторов)

Таблица 1

Результаты визуального и измерительного контроля изделий, напечатанных на 3D-принтере

Наименование дефекта	Характеристики дефекта		
	Состав №1	Состав №2	Состав №3
1	2	3	4
нарушение геометрии	более значительно	значительно	значительно
нарушение прямолинейности	более значительно	значительно	значительно
разрывы между слоями	отсутствуют	значительно	не значительно
разрывы по длине слоя	отсутствуют	значительно	отсутствуют
разнотолщинность	более значительно	значительно	отсутствуют
расплыв	более значительно	отсутствует	значительно

Примечание – Дефекты характеризовались критериями: более значительно / значительно / не значительно.

Как видно из рис. 1, наиболее оптимальной смесью для экструзии из рассматриваемых на исследуемом 3D-принтере является смесь состава №3, при этом ее применение не исключает образование дефектов 3D-печати. Выявленные дефекты напечатанного на 3D-принтере изделия из сырьевой смеси состава №3 приведены на рис. 2.



а) повышенная пористость

б) повсеместные наплывы



в) отклонение высоты слоев изделия от проектного значения



г) отклонение длины и ширины изделия от проектного значения, наплыв в стартовой точке



д) раковины на локальных участках



е) усадочные трещины на локальных участках

Рис. 2. Дефекты напечатанного на 3D-принтере изделия (иллюстрация авторов)

Как видно из таблицы 1, рис. 1, 2, подвижность и предельное напряжение сдвига смеси оказывает значительное влияние на качество строительной продукции, напечатанной на 3D-принтере. В наибольшей степени образованию дефектов в виде нарушения геометрии, прямолинейности, разнотолщинности, расплыва подвержена смесь с чрезмерной подвижностью и наименьшим предельным напряжением сдвига, при этом дефекты в виде разрывов между слоями и по длине слоя – отсутствуют. Смесь состава №2 с недостаточной подвижностью и большим предельным напряжением сдвига по сравнению с составом №2 характеризуется наличием дефектов в виде нарушения геометрии, прямолинейности, разрывов между слоями и по длине слоя, разнотолщинности, при этом отсутствием расплыва. Смесь состава №3 с подвижностью и предельным напряжением сдвига, близкими к оптимальным значениям, в наименьшей степени подвержена образованию рассматриваемых видов дефектов.

На втором этапе исследовано влияние особенностей моделирования цифровой модели изделия на качество строительной продукции, напечатанной на 3D-принтере.

Установлено, что образование дефектов в виде отклонений геометрических параметров напечатанного изделия связаны не только с величиной подвижности бетонной смеси, а также с некоторыми особенностями генерации G-code трехмерной цифровой модели образца и процесса ее 3D-печати (рис. 3, формула 1): 1) проектная (задаваемая) длина образца ($L_{пр}$) – расстояние между точками центра тяжести выдавливаемой сырьевой

смеси в начальном и конечном положениях сопла 3D-принтера во время печати; 2) фактическая длина образца – сумма проектной (задаваемой) длины образца ($L_{пр}$), длин ($L_{р.см.}$), вызванных растеканием сырьевой смеси, а также расстояний от центра тяжести выдавливаемой сырьевой смеси до ее грани ($a/2$) в начальном и конечном положениях сопла. При этом с увеличением подвижности длина ($L_{р.см.}$), вызванная растеканием сырьевой смеси, увеличивается.

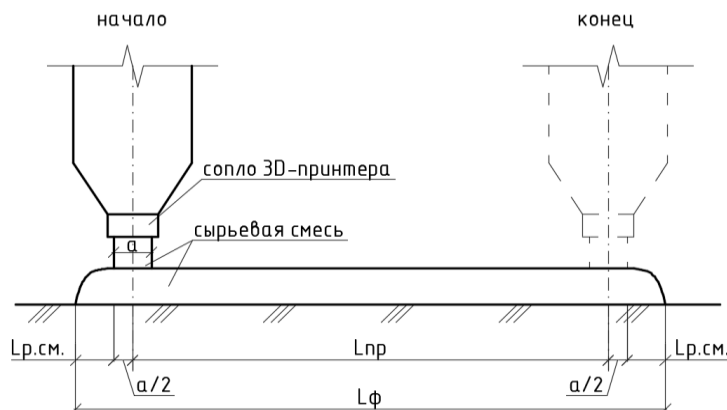


Рис. 3. Схема к определению фактической длины образцов, напечатанных на 3D-принтере [25]

$$L_{пр} = L_{ф} - \left(\frac{a}{2} \cdot 2 + L_{р.см.} \cdot 2 \right) \quad (1)$$

Отклонение длины (Δl) напечатанного изделия в таком случае примет следующий вид:

$$\Delta l = \frac{a}{2} \cdot 2 + L_{р.см.} \cdot 2 \quad (2)$$

На практике первое слагаемое формулы 2 возможно регулировать при создании управляющей программы печатаемого объекта (т.е. корректировкой G-code цифровой модели), поэтому им можно пренебречь. Тогда формула 2 будет описываться следующей функцией (3):

$$\Delta l = f(L_{р.см.}) \quad (3)$$

Для определения уравнения выявленной функции 3 исследовано влияние предельного напряжения сдвига растворной смеси на отклонение длины напечатанного изделия. G-code образца представлял собой полосу длиной 400 мм, количество печатаемых слоев – 4. В качестве переменного фактора X принято значение предельного напряжения сдвига смеси, в качестве функции отклика Y – отклонение длины напечатанного изделия. Результаты исследования приведены на рис. 4.

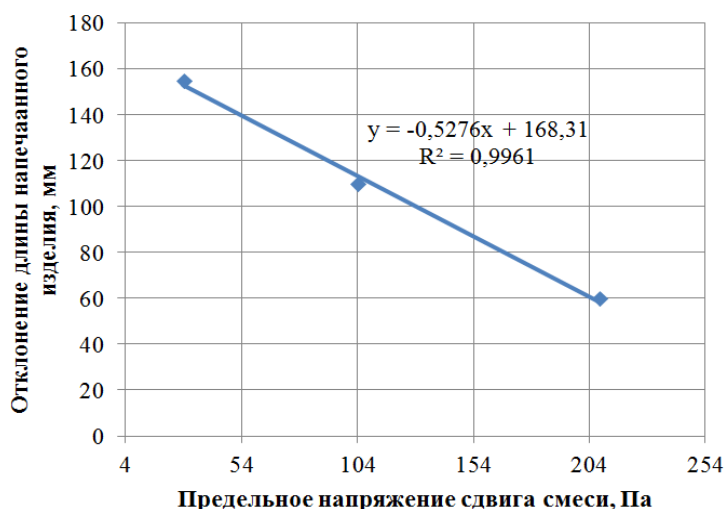


Рис. 4. Зависимость отклонения длины напечатанного изделия от предельного напряжения сдвига смеси (иллюстрация авторов)

Как видно из рис. 4, кривая зависимости отклонения длины напечатанного изделия от предельного напряжения сдвига смеси для образца, представляющего собой полосу в 4 слоя, имеет линейный характер и описывается следующим уравнением (4):

$$\Delta l = -0,5276 \cdot \tau_0 + 168,31 \quad (4)$$

Отклонение длины напечатанного образца тем выше, чем ниже предельное напряжение сдвига смеси. Полученное уравнение позволит прогнозировать отклонение длины напечатанного изделия в зависимости от подвижности смеси, предельного напряжения сдвига и получать изделия на 3D-принтере с длиной, соответствующей проектной.

На третьем этапе на основе анализа имеющихся данных систематизированы состав операций и средства контроля при возведении строительной продукции методом послойной экструзии (3D-печати) при входном, операционном и приемочном контроле.

Входной контроль предусматривает контроль применяемых строительных материалов, изделий, конструкций, полуфабрикатов и оборудования путем их проверки соответствия показателей качества материалов, изделий и оборудования требованиям нормативной документации, указанных в проектной документации и (или) договоре подряда, а также на наличие сопроводительных документов, подтверждающих данное качество. Входной контроль производится застройщиком и лицом, осуществляющим строительство.

Результаты входного контроля должны быть документированы в журналах входного контроля и лабораторных испытаний.

Готовность и исправность управляющей программы печатаемого объекта проверяется на ее бесперебойное воспроизведение 3D-принтером, исключая при этом возникновение ошибок, приводящих к сбою во время 3D-печати.

При необходимости в процессе 3D-печати могут применяться поддерживающие структуры в виде подложки из ламинированной фанеры, временные связевые элементы и др. Рабочие поверхности данных структур не должны иметь сколов, раковин, пустот и др. дефектов, перед применением их следует очистить от грязи, пыли. При этом они должны быть запроектированы таким образом, чтобы по завершению 3D-печати обеспечить их извлечение без повреждения напечатанного изделия, то есть поверхности поддерживающих структур, соприкасающиеся с бетоном, должны обладать минимальной адгезией к напечатанному бетону.

Кроме того, контролю подлежит выноска отметки стартовой точки экструзии на поверхности основания, поддерживающей структуры (при ее наличии) для обеспечения 3D-печати объекта в пределах рабочей зоны 3D-принтера.

Состав операций и средства контроля при создании строительной продукции методом послойной экструзии (3D-печати) при осуществлении входного контроля качества приведены в таблице 1.

Таблица 1

Состав операций и средства контроля при возведении строительной продукции методом послойной экструзии (3D-печати) при осуществлении входного контроля качества

Наименование процессов, подлежащих контролю	Контролируемые операции	Контроль (метод, объем)	Документация
Подготовительные работы	Проверить: – готовность и исправность управляющей программы печатаемого объекта; – наличие документов о качестве на компоненты сырьевой смеси (готовые сухие смеси), поддерживающую структуру (при ее наличии);	Визуальный То же	Паспорта (сертификаты), общий журнал работ
	– качество подготовки основания; – подготовленность всех механизмов и приспособлений, обеспечивающих производство работ с использованием строительного 3D-принтера – выноска отметки стартовой точки экструзии на поверхности основания, поддерживающей структуры (при ее наличии)	Визуальный, измерительный Визуальный Визуальный, измерительный	
Контрольно-измерительный инструмент: рулетка, отвес строительный, линейка металлическая			

Операционный контроль. Операционный контроль качества осуществляется застройщиком (техническим заказчиком) и лицом, осуществляющим строительство.

Технологический процесс следует организовывать исходя из технических возможностей и характеристик применяемого оборудования (установки АП), режимов 3D-печати, продолжительности технологических операций и перерывов при 3D-печати изделия – исходя из технологических и реологических показателей применяемой бетонной смеси.

Состав операций и средства контроля при создании строительной продукции методом послойной экструзии (3D-печати) при осуществлении операционного контроля качества приведены в таблице 2.

Приемочный контроль. При приемочном контроле возведения строительной продукции методом послойной экструзии (3D-печати) необходимо производить проверку качества выполненных строительно-монтажных работ, а также скрытых работ и отдельных конструктивных элементов с составлением актов освидетельствования скрытых работ и акта промежуточной приемки ответственных конструкций.

Технические критерии оценки приемочного контроля качества возведенной строительной продукции методом послойной экструзии (3D-печати) при осуществлении приемочного контроля качества приведены в таблице 3.

Таблица 2

Состав операций и средства контроля при возведении строительной продукции методом послойной экструзии (3D-печати) при осуществлении операционного контроля качества

Наименование процессов, подлежащих контролю	Контролируемые операции	Контроль (метод, объем)	Документация
Приготовление бетонной смеси, экструзия (3D-печать), твердение бетона	Контролировать: – точность дозирования компонентов бетонной смеси; – свойства приготовленной бетонной смеси (подвижность, предельное напряжение сдвига, сохраняемость свойств и т.д.); – заданные режимы экструзии (скорость экструзии, скорость движения печатающей головки 3D-принтера); – длина, высота и ширина печатаемых слоев; – температурно-влажностный режим твердения бетона согласно требованиям ППР	Лабораторный То же Технический осмотр Визуальный, измерительный Измерительный	Общий журнал работ, журнал бетонных работ
Контрольно-измерительный инструмент: рулетка, отвес строительный, линейка металлическая, нивелир, уровень лазерный, пенетромтр карманный			
Операционный контроль осуществляют: мастер (прораб), инженер лабораторного поста, геодезист			

Таблица 3

Состав операций и средства контроля строительной продукции, возведенной методом послойной экструзии (3D-печати) при осуществлении приемочного контроля качества

Наименование процессов, подлежащих контролю	Контролируемые операции	Контроль (метод, объем)	Документация
Приемка выполненных работ	Проверить: – соответствие геометрических параметров проектным; – качество поверхности бетона, в т.ч. и после ее постобработки; – фактическая прочность бетона; – соответствие проектному положению возведенных конструкций (отклонение от соосности вертикальных конструкций, отклонения от прямолинейности и плоскостности)	Визуальный, измерительный То же Лабораторный Визуальный, измерительный	Общий журнал работ, геодезическая исполнительная схема
Контрольно-измерительный инструмент: рулетка, отвес строительный, линейка металлическая, нивелир, уровень лазерный			
Приемочный контроль осуществляют: мастер (прораб), инженер лабораторного поста, геодезист в процессе работ, представители технического надзора заказчика			

4. Заключение

1. Установлено влияние подвижности сырьевой смеси на качество строительной продукции, получаемой методом послойной экструзии (3D-печати). Для малоподвижных смесей характерно преимущественно образование дефектов в виде нарушения геометрии, прямолинейности, разрывов между слоями и по длине слоя, разнотолщинности, отсутствие расплыва. Более подвижные смеси отличаются большей степенью образования дефектов в виде нарушения геометрии, прямолинейности, разнотолщинности, расплыва, однако дефекты в виде разрывов между слоями и по длине слоя – отсутствуют.
2. Установлено, что для получения изделий с требуемыми геометрическими размерами необходимо учитывать особенности при формировании G-code трехмерной цифровой модели и растекание смеси в процессе экструзии. Установлено, что фактическая длина печатаемого на 3D-принтере изделия складывается из 1) проектной (задаваемой) длины образца ($L_{пр}$) – расстояние между точками центра тяжести выдавливаемой сырьевой смеси в начальном и конечном положениях сопла 3D-принтера; 2) расстояний от центра тяжести выдавливаемой сырьевой смеси до ее грани ($a/2$) в начальном и конечном положениях сопла; 3) длин ($L_{р.см.}$), вызванных растеканием сырьевой смеси. В некоторой степени эти особенности можно компенсировать при помощи регулирования технологических параметров 3D-печати (диаметр сопла, скорость вращения шпинделя, скорость подачи и др.).
3. Определена зависимость геометрических отклонений длины печатаемого изделия, представляющего собой многослойные полосы, от предельного напряжения сдвига смеси, при постоянных режимах 3D-печати, выражающаяся линейной функцией. Снижение предельного напряжения сдвига с 208 до 29 Па приводит к снижению геометрических отклонений длины напечатанных образцов на 23,75%.
4. Разработаны основные положения организации и осуществления контроля качества при возведении строительной продукции методом 3D-печати, устанавливающие состав операций и средства контроля при производстве работ.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке ООО «ЗД-Строй» (Россия, г. Казань), стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (СП-1051.2021.1).

Список литературы

1. Хозин В. Г., Хохряков О. В., Низамов Р. К. Карбонатные цементы низкой водопотребности - перспективные вяжущие для бетонов // Бетон и железобетон. 2020. №1(601). С. 15–28.
2. Строганов В. Ф., Амельченко М. О., Мухаметрахимов Р. Х., Вдовин Е. А., Табаева Р. К. Повышение уровня адгезии стирол-акриловых покрытий, модифицированных наполнителем - шунгитом при защите строительных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2021. № 9. С. 29–32.
3. Чернышева, Н.В., Лесовик, В.С., Володченко, А.А., Глаголев, Е.С., Дребезгова М. Ю. Композиционные материалы с использованием энергосберегающего техногенного сырья для 3D аддитивных технологий // Сборник «Наукоемкие технологии и инновации» сборник докладов международной научно-практической конференции. 2016. С. 452–456.
4. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения».
5. Горбач П.С., Шустов П.А., Левчук С. С. Аддитивные методы производства в строительной отрасли // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2016. №10. С. 174–177.

6. Золотарева С. В. Развитие и применение 3D технологий в строительстве // Сборник трудов VII Международного молодежного форума «Образование, наука, производство». 2016. С. 1033–1037.
7. Гуторов Н.Ю., Чепенко А.С., Науменко Н.А., Павленко О. А. Аддитивные технологии и современные технологии строительства // Сборник докладов X Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 4 т. 2017. С. 85–87.
8. Матюхина А.А., Никифорова Н.А., Никулина А.С., Дементьева Ю.А., Лесниченко Е. Н. Преимущества аддитивных технологий и пути совершенствования 3D строительства // Сборник трудов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. С. 2185–2189.
9. Лунева Д.А., Кожевникова Е.О., Калошина С. В. Технология 3D-печати с использованием метода послойного экструдирования в строительстве // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2017. № 2. С. 251–261.
10. Duballet R., Baverel O., Dirrenberger J. Classification of building systems for concrete 3D printing // Autom. Constr. Elsevier, 2017. Vol. 83. P. 247–258. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.08.018.
11. Nematollahi B., Xia M., Sanjayan J. Current Progress of 3D Concrete Printing Technologies // 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2017), At Taipei, Taiwan. 2017. DOI: 10.22260/ISARC2017/0035.
12. Kruger P. J. Rheo-mechanics modelling of 3D concrete printing constructability. Stellenbosch University, 2019. № December. DOI: 10.13140/RG.2.2.16259.04649.
13. Verian K. P., Ashcroft J., Carli M. D., Bright R. P., Maandi E., Avakian A., Baaklini E. Improving the Bonding Adhesion of the Cold Joints of Normal and Lightweight 3D Printing Mortars // RILEM Bookseries. 2020. Vol. 28. 527–536 p. DOI: 10.1007/978-3-030-49916-7_54.
14. Tay Y. W. D., Qian Y., Tan M. J. Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test // Compos. Part B Eng. Elsevier Ltd, 2019. Vol. 174. № February. P. 106968. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.106968.
15. Иноземцев А. С., Королев Е. В., Зыонг Тхань Куй. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2018. №7(118). С. 863–876. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-876.
16. Королев Е. В., Зыонг Т. К., Иноземцев А. С. Способ обеспечения внутреннего ухода за гидратацией цемента в составах для 3D-печати // Вестник МГСУ. 2020. №6(15) 6. С. 834–846. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.834-846.
17. Зыонг, Т.К. Высокопрочные легкие фибробетоны конструкционного назначения: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Зыонг Тхань Куй. – М., 2020. – 201 с.
18. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Глаголев Е.С., Чернышева Н.В., Дребезгова М.Ю., Кучерова А.С. Канева Е. В. Современные трехмерные технологии и факторы, сдерживающие их // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №1(12). С. 22–30. DOI: 10.12737/23011.
19. Полуэктова В.А. Закономерности поверхностных явлений и модифицирования полимерминеральных дисперсий для аддитивных технологий: дис. ... д-ра техн. наук: 1.4.10 / Полуэктова Валентина Анатольевна. – Белгород, 2022. - 517 с.
20. Новосадов Н.И., Полуэктова В. А. Прочностные характеристики полимерцементного композита для аддитивных технологий // Сборник материалов III Международной научно-практической конференции. 2017. С. 133–137.
21. Slavcheva, G. S., Artamonova O. V. Rheological behavior of 3D printable cement paste: criterial evaluation // Инженерно-строительный журнал. 2018. Vol. 8. № 84. P. 97–108. DOI: 10.18720/MCE.84.10.
22. Славчева Г. С., Бритвина Е. А., Ибряева А.И. Строительная 3D-печать: оперативный метод контроля реологических характеристик смесей // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2019. №4(41). С. 134–143. DOI: 10.24866/2227-6858/2019-4-14.
23. Славчева Г. С., Артамонова О. В. Реологическое поведение дисперсных систем для строительной 3D-печати: проблема управления на основе возможностей арсенала «Нано» // Нанотехнологии в строительстве научный интернет-журнал. 2018. №3(10). С. 107–122. DOI: 10.15828/2075-8545-2018-10-3-107-122.

24. Мухаметрахимов Р. Х., Горбунова П. С. Роль дисперсного армирования в формировании технологических свойств и реологических свойств бетонных смесей для строительной 3D-печати // Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса. 2019. С. 270–274.
25. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Influence of cement-sand mortar mobility on the quality of 3D printed hardened composite // Constr. Unique Build. Struct. 2021. Vol. 94. № 1. P. 9404. DOI: 10.4123/CUBS.94.4.
26. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Structure and properties of mortar printed on a 3D printer // Mag. Civ. Eng. 2021. Vol. 102. № 2. DOI: 10.34910/MCE.102.6.
27. ГОСТ Р 57590-2017 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы - часть 3. Общие требования».
28. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Investigation of portland cement in 3d concrete printing // Lect. Notes Civ. Eng. 2021. Vol. 169. P. 1–13. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_1.
29. Jianchao Z., Zhang T., Faried M., Wengang C. 3D printing cement based ink, and it's application within the construction industry // ASCMCES-17. MATEC Web of Conferences, 2017. P. 02003.
30. Pshtiwan S., Shami N., Gavin P. A Study into the Effect of Different Nozzles Shapes and Fibre-Reinforcement in 3D Printed Mortar // Materials (Basel). 2019. Vol. 12. № 10. DOI: 10.3390/ma12101708.
31. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Influence of the technological properties of cement-sand mortar on the quality of 3D printed products // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 890. P. 012082. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012082.
32. Slavcheva G. S. Drying and shrinkage of cement paste for 3D printable concrete // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2019. Vol. 481. № 1. DOI: 10.1088/1757-899X/481/1/012043.
33. Королев Е. В., Зыонг Т. К., Иноземцев А. С. Способ обеспечения внутреннего ухода за гидратацией цемента в составах для 3D-печати // Вестник МГСУ. 2020. №6. С. 834–846. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.834-846.
34. Klyuev S. V., Klyuev A. V., Shorstova E. S. Fiber concrete for 3-D additive technologies // Mater. Sci. Forum. 2019. № 974. P. 367–372.
35. Рыбьев И. А. Строительное материаловедение. Москва: Высшая школа, 2004. 701 с.
36. Теличенко В.И. Технология строительных процессов: В 2 ч. Ч. 1.: Учебник / В.И. Теличенко, О.М. Терентьев, А.А. Лапидус - 4-е изд., стер. - М.: Высш. шк., 2008. - 392 с.
37. Buswell R. A., Leal de Silva W. R., Jones S. Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research // Cem. Concr. Res. 2018. Vol. 112. P. 37–49. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
38. Marchment T., Sanjayan J., Xia M. Method of enhancing interlayer bond strength in construction scale 3D printing with mortar by effective bond area amplification // Mater. Des. 2019. № 169. P. 107684. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107684.
39. Le T.T., Austin S.A. et al. Hardened properties of high-performance printing concrete // Cem. Concr. Res. 2012. Vol. 42. № 3. P. 558–566. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.12.003.
40. ГОСТ Р 57587-2017 «Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний».
41. Баженов Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. - М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. - 368 с.

References

1. Khozin V. G., Khokhryakov O. V., Nizamov R. K. Carbonate cements of low water demand as promising binders for concrete // Concrete and reinforced concrete. 2020. №1(604). P. 15–28.
2. Stroganov V. F., Amelchenko M. O., Mukhametrahimov R. Kh., Vdovin E. A., Tabaeva R. K. Increasing the level of adhesion of styrene-acrylic coatings modified with shungite filler in the protection of building materials. Adhesives. . Sealants. Technology. 2021. №9. P. 29–32.
3. Chernysheva N.V., Lesovik V.S., Volodchenko A.A., Glagolev E.S., Drebezgova M. Yu. Composite materials using energy-saving technogenic raw materials for 3D additive technologies // Collection “Science-intensive technologies and innovations” collection of reports of the international scientific-practical conference. 2016. P. 452–456.
4. GOST R 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 “Additive manufacturing processes. Basic principles. Part 1. Terms and definitions.
5. Gorbach P.S., Shustov P.A., Levchuk S.S. Additive production methods in the construction industry // Bulletin of the Angarsk State Technical University. 2016. No. 10. P. 174–177.
6. Zolotareva S. V. Development and application of 3D technologies in construction // Proceedings of the VII International Youth Forum "Education, Science, Production". 2016. P. 1033–1037.
7. Gutorov N.Yu., Chepenko A.S., Naumenko N.A., Pavlenko O.A. Additive technologies and modern construction technologies // Collection of reports of the X International scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists : in 4 volumes. 2017. P. 85–87.
8. Matyukhina A.A., Nikiforova N.A., Nikulina A.S., Dementieva Y.A., Lesnichenko E.N. Advantages of additive technologies and ways to improve 3D construction. technical conference of young scientists of BSTU. 2017. P. 2185–2189.
9. Luneva D.A., Kozhevnikova E.O., Kaloshina S.V. 3D printing technology using layer-by-layer extrusion in construction // Modern technologies in construction. Theory and practice. 2017. №2. P. 251–261.
10. Duballet R., Baverel O., Dirrenberger J. Classification of building systems for concrete 3D printing // Autom. Constr. Elsevier, 2017. Vol. 83. P. 247–258. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.08.018.
11. Nematollahi B., Xia M., Sanjayan J. Current Progress of 3D Concrete Printing Technologies // 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2017), At Taipei, Taiwan. 2017. DOI: 10.22260/ISARC2017/0035.
12. Kruger P. J. Rheo-mechanics modelling of 3D concrete printing constructability. Stellenbosch University, 2019. № December. DOI: 10.13140/RG.2.2.16259.04649.
13. Verian K. P., Ashcroft J., Carli M. D., Bright R. P., Maandi E., Avakian A., Baaklini E. Improving the Bonding Adhesion of the Cold Joints of Normal and Lightweight 3D Printing Mortars // RILEM Bookseries. 2020. Vol. 28. 527–536 p. DOI: 10.1007/978-3-030-49916-7_54.
14. Tay Y. W. D., Qian Y., Tan M. J. Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test // Compos. Part B Eng. Elsevier Ltd, 2019. Vol. 174. № February. P. 106968. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.106968.
15. Inozemtsev A. S., Korolev E. V., Zuong T. K.. Analysis of existing technological solutions for 3D printing in construction. Vestnik MGSU. 2018. №7(118). P. 863–876. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-876.
16. Korolev E. V., Zuong T. K., Inozemtsev A. S. A method for providing internal care for cement hydration in 3D printing formulations. Vestnik MGSU. 2020. № 6(15) 6. P. 834–846. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.834-846.
17. Zuong T.K. High-strength lightweight fiber-reinforced concrete for structural purposes: Thesis / Zuong Thanh Kui. - M., 2020. - 201 p.
18. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.K., Glagolev E.S., Chernysheva N.V., Drebezgova M.Y., Kucherova A.S. Kaneva E. V. Modern three-dimensional technologies and factors restraining them. // Bulletin of BSTU. 2016. №1(12). P. 22–30. DOI: 10.12737/23011.
19. Poluektova V.A. Patterns of surface phenomena and modification of polymer-mineral dispersions for additive technologies: Thesis / Poluektova Valentina Anatolyevna. - Belgorod, 2022. - 517 p.

20. Novosadov N.I., Poluektova V.A. Strength characteristics of a polymer-cement composite for additive technologies // Collection of materials of the III International Scientific and Practical Conference. 2017. P. 133–137.
21. Slavcheva G. S., Artamonova O. V. Rheological behavior of 3D printable cement paste: criterial evaluation // Magazine of Civil Engineering. 2018. №8(84). P. 97–108. DOI: 10.18720/MCE.84.10.
22. Slavcheva G. S., Britvina E. A., Ibryaeva A.I. Construction 3D printing: an operational method for monitoring the rheological characteristics of mixtures // Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University. 2019. №4 (41). C. 134–143. DOI: 10.24866/2227-6858/2019-4-14.
23. Slavcheva G. S., Artamonova O. V. Rheological behavior of dispersed systems for building 3D printing: a control problem based on the capabilities of the Nano arsenal // Nanotechnologies in construction scientific Internet journal. 2018. No. 3(10). P. 107–122. DOI: 10.15828/2075-8545-2018-10-3-107-122.
24. Mukhametrakhimov R. K., Gorbunova P. S. The role of dispersed reinforcement in the formation of technological properties and rheological properties of concrete mixtures for building 3D printing // Actual problems and prospects for the development of the construction complex. 2019. P. 270–274.
25. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Influence of cement-sand mortar mobility on the quality of 3D printed hardened composite // Constr. Unique Build. Struct. 2021. Vol. 94. № 1. P. 9404. DOI: 10.4123/CUBS.94.4.
26. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Structure and properties of mortar printed on a 3D printer // Mag. Civ. Eng. 2021. Vol. 102. № 2. DOI: 10.34910/MCE.102.6.
27. GOST R 57590-2017 “Additive technological processes. Basic principles - part 3. General requirements.
28. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Investigation of portland cement in 3d concrete printing // Lect. Notes Civ. Eng. 2021. Vol. 169. P. 1–13. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_1.
29. Jianchao Z., Zhang T., Faried M., Wengang C. 3D printing cement based ink, and it's application within the construction industry // ASCMCES-17. MATEC Web of Conferences, 2017. P. 02003.
30. Pshtiwan S., Shami N., Gavin P. A Study into the Effect of Different Nozzles Shapes and Fibre-Reinforcement in 3D Printed Mortar // Materials (Basel). 2019. Vol. 12. № 10. DOI: 10.3390/ma12101708.
31. Mukhametrakhimov R., Lukmanova L. Influence of the technological properties of cement-sand mortar on the quality of 3D printed products // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 890. P. 012082. DOI: 10.1088/1757-899x/890/1/012082.
32. Slavcheva G. S. Drying and shrinkage of cement paste for 3D printable concrete // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2019. Vol. 481. № 1. DOI: 10.1088/1757-899X/481/1/012043.
33. Korolev E. V., Zuong T. K., Inozemtsev A. S. A method for providing internal care for cement hydration in 3D printing formulations. Vestnik MGSU. 2020. №6. P. 834–846. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.6.834-846.
34. Klyuev S. V., Klyuev A. V., Shorstova E. S. Fiber concrete for 3-D additive technologies // Mater. Sci. Forum. 2019. № 974. P. 367–372.
35. Rybiev I. A. Building materials science. Moscow: Higher School, 2004. 701 p.
36. Telichenko V.I. Technology of building processes: In 2 hours. Part 1: Textbook / V.I. Telichenko, O.M. Terentiev, A.A. Lapidus - 4th ed., Sr. - M.: Higher. School, 2008. - 392 p.
37. Buswell R. A., Leal de Silva W. R., Jones S. Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research // Cem. Concr. Res. 2018. Vol. 112. P. 37–49. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
38. Marchment T., Sanjayan J., Xia M. Method of enhancing interlayer bond strength in construction scale 3D printing with mortar by effective bond area amplification // Mater. Des. 2019. № 169. P. 107684. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107684.
39. Le T.T., Austin S.A. et al. Hardened properties of high-performance printing concrete // Cem. Concr. Res. 2012. Vol. 42. № 3. P. 558–566. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.12.003.
40. GOST R 57587-2017 “Products obtained by the method of additive technological processes. Methods of control and testing”.

41. Bazhenov Y.M. Modified high-quality concretes / Y.M. Bazhenov, V.S. Demyanova, V.I. Kalashnikov. - M.: Publishing House of the Association of Construction Universities, 2006. - 368p.

Информация об авторах.

Мухаметрахимов Р.Х., кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: muhametrahimov@mail.ru

Зиганшина Л.В., аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: lilya0503199@gmail.com

Information about the authors

Mukhametrakhimov R. Kh., candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

E-mail: muhametrahimov@mail.ru

Ziganshina L.V., postgraduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

E-mail: lilya0503199@gmail.



Моделирование процессов опреснения воды в комбинированной водоподготовительной установке

Р.А.Садыков¹, А.К. Мухаметзянова¹, Л.Р.Джунусова², А.А.Елеманова²

²Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г.Казань,
Российская Федерация

³Алматинский университет энергетики и связи, г.Алматы,
Республика Казахстан

Аннотация: Обеспечение населения РФ качественной хозяйственно-питьевой воды является для многих климатических режимов страны одной из приоритетных проблем, так как 16,8 % проб водопроводной воды не соответствует нормативам по химическим показателям, а 20 % населения потребляет воду без требуемой предварительной очистки, комплексное решение которой необходимо для сохранения здоровья, улучшения условий деятельности и повышения условий жизни населения.

Целью исследования является физико-математическое описание процессов переноса по обессоливанию грунтовых вод в комбинированной ультра- и нанофильтрационной водоподготовительной установке, используемой для систем водо- и теплоснабжения. Задачами исследования являются корректная формализация математической модели процессов массопереноса в комбинированной водоподготовительной установке и получение аналитических замкнутых решений краевых задач нестационарного диффузионного переноса для кусочно-однородных сред при различных условиях однозначности и нестационарных, несимметричных граничных условиях на поверхностях контакта неоднородных сред, а также анализ полученного обобщенного аналитического решения краевых задач математической модели комбинированной водоподготовительной установки при различных начальных и граничных условиях.

Основные результаты исследования состоят в том, что авторами была формализована математическая модель процесса очистки грунтовых вод и краевая задача математической модели процессов опреснения воды в комбинированной водоподготовительной установке, и найдены аналитические замкнутые решения краевых задач нестационарного молекулярного переноса для кусочно-однородных сред при различных исходных условиях однозначности и неустановившихся, несимметричных граничных условиях на поверхностях контакта двух неоднородных сред. Полученные аналитические решения формализованной математической модели позволяют путём нахождения экстремальных значений изменения концентрации взвешенных частиц от независимых переменных оптимизировать процессы очистки воды в теплоэнергетических установках, могут быть тестовыми задачами для более сложных нелинейных краевых задач процессов тепло- и массопереноса. Для масштабных переходов разработанную математическую модель можно переписать в безразмерном виде, как изменение относительной концентрации от массообменного критерия Фурье.

В работе получены аналитически замкнутые решения краевых задач нестационарного диффузионного переноса для кусочно-однородных сред при различных условиях однозначности и нестационарных краевых условиях на поверхностях контакта различных однородных сред, применяемые к процессам водоочистки систем теплоснабжения. Для масштабных переходов (от экспериментальной к промышленной установке) постановку и решения подобных краевых задач можно записать в критериальном виде, как изменение относительной концентрации от массообменного критерия Фурье.

Значимость полученных результатов состоит в том, что полученные аналитические решения краевых задач позволяют оптимизировать процессы очистки воды в комбинированной водоподготовительной установке и могут быть тестовыми краевых задач при численном решении более сложных нелинейных краевых задач несвязанного и взаимосвязанного тепло- и массопереноса, а оптимальные значения аналитических

решений краевых задач могут быть использованы в АСУТП при выборе энергоресурсосберегающих режимов управления.

Ключевые слова: питьевая вода, фильтрация, установка, математическая модель, краевая задача, дифференциальное уравнение, условия.

Для цитирования: Р.А.Садыков, А.К. Мухаметзянова, Л.Р.Джунусова, А.А.Елеманова Моделирование процессов опреснения воды в комбинированной водоподготовительной установке//Известия КГАСУ 2022, №1(59), С 80-89. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_80

Simulation of water desalination processes in a combined water treatment plant

R.A.Sadykov¹, A.K. Mukhamezianova¹, L.R. Junussova², A.A.Elemanova²

¹Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan,
Russian Federation

²Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty,
Kazakhstan

Abstract: The aim of the study is a physical and mathematical description of the transfer processes for desalting groundwater in a combined ultra- and nanofiltration water treatment plant used for water and heat supply systems. The objectives of the study are the following: correct formalization of the mathematical model of mass transfer processes in a combined water treatment plant; obtaining analytical closed solutions of boundary value problems of unsteady diffusion transfer for piecewise-homogeneous media under various conditions of uniqueness and unsteady, asymmetric boundary conditions on the contact surfaces of inhomogeneous media; and analysis of the obtained generalized analytical solution of boundary value problems of a mathematical model of a combined water treatment plant under various initial and boundary conditions.

The main results of the study are that the authors formalized a mathematical model of the groundwater treatment process and a boundary value problem of a mathematical model of water desalination processes in a combined water treatment plant, and found analytical closed solutions to boundary value problems of unsteady molecular transfer for piecewise homogeneous media under various initial conditions of uniqueness and unsteady, asymmetric boundary conditions on the contact surfaces of two inhomogeneous media. The obtained analytical solutions of the formalized mathematical model make it possible to optimize the processes of water purification in heat power plants by finding the extreme values of the change in the concentration of suspended particles from independent variables. The analytical solutions can be test problems for more complex nonlinear boundary value problems of heat and mass transfer processes. For large-scale transitions, the developed mathematical model can be rewritten in dimensionless form, as a change in the relative concentration from the Fourier mass transfer criterion.

In this work, analytically closed solutions of boundary value problems of unsteady diffusion transfer for piecewise homogeneous media are obtained under various conditions of uniqueness and unsteady boundary conditions on the contact surfaces of various homogeneous media, which are applied to the processes of water purification of heat supply systems. For large-scale transitions (from an experimental to an industrial installation), the formulation and solution of such boundary value problems can be written in a criterion form, as a change in the relative concentration from the Fourier mass transfer criterion. The significance of the obtained results lies in the fact that the obtained analytical solutions of boundary value problems make it possible to optimize the processes of water treatment in a combined water treatment plant and can become test boundary value problems in the numerical solution of more complex nonlinear boundary value problems of unconnected and interconnected heat and mass transfer. Optimal values of analytical solutions of boundary value problems tasks can be also used in the process control system when choosing energy-saving control modes.

Keywords: drinking water, filtration, plant, mathematical model, boundary value problem, differential equation, conditions.

For citation: R.A. Sadykov, A.K. Mukhamezianova, L.R. Junussova, A.A. Elemanova Simulation of water desalination processes in a combined water treatment plant//News KSUAE 2022, №1 (59), С 80-89. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_80

1. Введение

Во многих актуальных прикладных краевых задачах (КЗ) молекулярного переноса (диффузии, теплопроводности, фильтрации) для кусочно-однородных сред (КОС) приходится иметь дело с граничными условиями (ГУ), когда потенциалы переноса (концентрация, влагосодержание, температура, давление) субстанции на границе контакта различных слоев являются некоторой заданной функцией времени. В этом случае ГУ для следующего слоя неоднородно и нестационарно. В силу условия сопряжения КОС оно является ГУ для потенциала переноса на отрезке следующего (отличного от предыдущего) однородного слоя. Аналитические решения подобных нестационарных КЗ применены для формализации математических моделей (ММ) процессов опреснения питьевой воды на ультрафильтрационной наномембранной комбинированной водоподготовительной установке (КПВУ) в системах водо- и теплоснабжения населенных мест и производственных объектов [1-14].

Для более полного физического представления математического описания процессов массопереноса в КПВУ технологические схемы этих установок рассмотрены в [5-10].

Анализ литературного обзора показал, что остается не решенной проблема корректной формализации математической модели процессов массопереноса в комбинированных водонагревательных установках, а также получение и обобщение аналитического решения краевых задач этих математических моделей.

С учетом результатов данного анализа, целью исследования является физико-математическое описание процессов переноса по обессоливанию грунтовых вод в КПВУ, используемой для систем водо- и теплоснабжения.

Задачами исследования являются:

-Корректная формализация ММ процессов массопереноса в КПВУ.

-Получение аналитических замкнутых решений КЗ нестационарного диффузионного переноса для КОС при различных условиях однозначности и нестационарных, несимметричных ГУ на поверхностях контакта неоднородных сред.

-Анализ полученного обобщенного аналитического решения КЗ ММ КПВУ при различных начальных и граничных условиях.

2. Материалы и методы

Математическую модель (ММ) процессов опреснения грунтовой воды на ультрафильтрационной наномембранной КПВУ систем водо- и теплоснабжения можно представить как решение краевой задачи (КЗ) молекулярной диффузии для КОС, когда концентрация вещества $C(x, \tau)$ на границе контактирующих слоев фактически является некоторой заданной функцией времени $\mu(\tau)$, т.е. является решением КЗ для предыдущего слоя при заданной его длине или в толщине $C(l, \tau) = \mu(\tau)$, и которое в силу ГУ «склеивания» служит начальным нестационарным ГУ для концентрации на отрезке следующего однородного слоя.

ММ процесса фильтрации неочищенной жидкости можно рассмотреть, как решение двух сопряженных КЗ. В физической постановке, в первой - исходной нестационарной КЗ, рассматривается процесс молекулярной диффузии, протекающий в непроницаемой трубе ($\nabla C = 0$) с внутренним диаметром d и длиной $l \gg d$, в которой заданы жидкая среда с коэффициентом диффузии (D_1) и начальной концентрацией коллоидных взвешенных частиц $C_1(x, \tau_0) = \varphi(x)$. Во второй КЗ, сопрягаемой с исходной КЗ ГУ $C(l, \tau) = \mu(\tau)$, а на отрезке трубы $x > l$ диффундирующего вещества нет [$C_2(x, \tau_0) = 0$] и этот отрезок непроницаемой трубы заполнен средой (слоем адсорбента,

мембраны или абсорбента) с коэффициентом диффузии D_2 [10]. На границе $x=l$ находится непроницаемая заслонка (затвор), которая при $\tau=\tau_0$ открывается и при заданном расходе жидкости начинается молекулярный массоперенос, в течении которого определяется поле концентраций $C(x,\tau)$ взвешенных частиц для $x > 0$ [11-14].

Математически поставленную КЗ можно формализовать в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{i\tau} = D_i C_{ixx}, \quad i = \{1, \text{ если } x \in (x_1, x_2), \text{ либо } 2, \text{ если } x > x_2\}, \quad \tau > \tau_0, \quad (1) \\ C_1(x, \tau_0) = \varphi(x) = \{C_0, \text{ если } x \in (x_1, x_2), \text{ либо } 0, \text{ если } x < x_1 \text{ и } x > x_2\}, \quad (2) \\ C_{1x}(x_1, \tau) = 0, \quad (3) \\ C_2(x, \tau_0) = 0, \quad (4) \\ C_2(x_2, \tau) = C_1(x_2, \tau) = \mu(\tau). \quad (5) \end{array} \right.$$

Если использовать фильтрующее свойство обобщенной функции Дирака [14], то начальное распределение концентрации $\varphi(x)$ можно представить «разложенным» на импульсы:

$\varphi(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) \delta(x, \xi) d\xi$, где $\delta(x, \xi)$ - импульсная функция Дирака, представляющая предел физического импульса $\varphi_\xi(x)$ при $\xi \rightarrow 0$.

3. Результаты

Решение поставленной КЗ ($i=1$) можно представить в виде:

$$C_1(x, \tau) = \int_{x_1}^{x_2} \varphi(\xi) [G(x, \xi, \tau, \tau_0) + G(x, -\xi, \tau, \tau_0)] d\xi, \quad (6)$$

где $\begin{cases} G(x, \xi, \tau, \tau_0) = \left\{ 2\sqrt{\pi D_1(\tau - \tau_0)} \exp \left[\frac{(x-\xi)^2}{4D_1(\tau - \tau_0)} \right] \right\}^{-1}, \\ G(x, -\xi, \tau, \tau_0) = \left\{ 2\sqrt{\pi D_1(\tau - \tau_0)} \exp \left[\frac{(x+\xi)^2}{4D_1(\tau - \tau_0)} \right] \right\}^{-1} \end{cases}$ - функции влияния [14,15].

Тогда с учетом начального условия (2) получим

$$C_1(x, \tau) = \frac{C_0}{2} \{F(x_1) + F(x_2)\}, \quad (7)$$

где $F(x_1) = \Phi\left(\frac{x-x_1}{2\sqrt{D_1(\tau-\tau_0)}}\right) - \Phi\left(\frac{x+x_1}{2\sqrt{D_1(\tau-\tau_0)}}\right)$, $F(x_2) = \Phi\left(\frac{x+x_2}{2\sqrt{D_1(\tau-\tau_0)}}\right) - \Phi\left(\frac{x-x_2}{2\sqrt{D_1(\tau-\tau_0)}}\right)$,

$$\operatorname{erf}(\eta) = \Phi(\eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-\alpha^2} d\alpha - \text{интеграл вероятностей } (\eta = \frac{x}{2\sqrt{D_1(\tau-\tau_0)}}) [16].$$

В частности, полагая $x_2 = l$, получим

$$C(x, \tau) = \frac{C_0}{2} \left[\Phi\left(\frac{x+l}{2\sqrt{D_1\tau}}\right) - \Phi\left(\frac{x+l}{2\sqrt{D_2\tau}}\right) \right], \quad (7a)$$

Графическое представление функциональных зависимостей $C(x, \tau)$ при различных фиксированных значениях $\tau > 0$ (по формуле (7a)) показаны на рис.1. Ввиду того, что массообмена с окружающей средой нет ($\nabla C = 0$), то площадь под каждым графиком равна $C l_0$ (на рис.4 заштрихована).

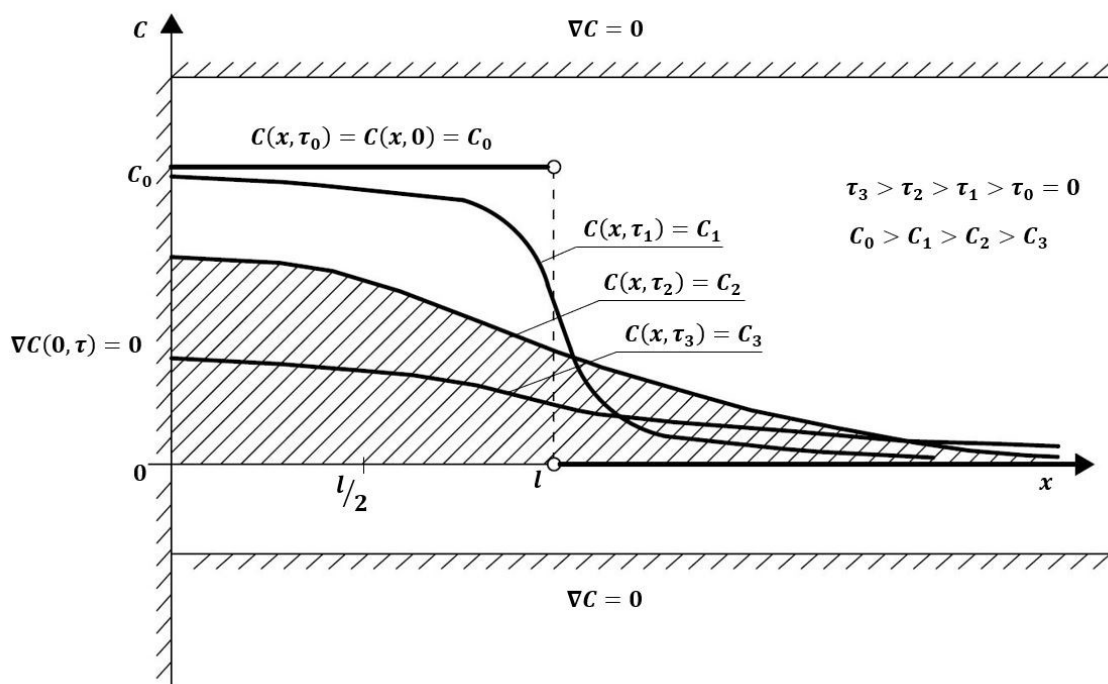


Рис. 1. Графическое представление функциональных зависимостей $C(x, \tau)$ при различных фиксированных значениях $\tau > 0$.

Если осуществить в начальном условии (НУ) предельный переход, то $C_1(x, \tau_0) = \varphi(x) = \delta(x, x_1)$, а решение КЗ ($i=1$) будет равно следующей сумме фундаментальных решений дифференциального уравнения (ДУ) молекулярного переноса

$$C_1(x, \tau) = G(x, x_1, \tau, \tau_0) + G(x, -x_1, \tau, \tau_0). \quad (8)$$

В частности, если в (6) положить $x_1 = 0$, $x_2 = l$, следует $F(x_1) = 0$, а решение (7) примет вид:

$$C_1(x, \tau) = \frac{C_0}{2} \left[\Phi\left(\frac{x+l}{2\sqrt{D_1(\tau-\tau_0)}}\right) - \Phi\left(\frac{x-l}{2\sqrt{D_1(\tau-\tau_0)}}\right) \right], \quad (9)$$

при ГУ $x = l$ следует

$$C_1(l, \tau) = C_2(l, \tau) = \frac{C_0}{2} \left[\Phi\left(\frac{l}{\sqrt{D_1(\tau-\tau_0)}}\right) \right] = \mu(\tau). \quad (10)$$

Это значение концентрации (10) в силу условия «склеивания», служит ГУ для $C_2(x, \tau)$ на отрезке $x > l$. Опуская далее промежуточные выкладки, окончательное решение поставленной КЗ (при $i=2$) будет

$$C_2(x, \tau) = \frac{C_0}{2} (x-l) \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{\mu(t)}{(\tau-t)} G(x, l, \tau, t) dt, \quad x > l, \quad (11)$$

где $G(x, l, \tau, t) = \left\{ 2\sqrt{\pi D_2(\tau-t)} \exp\left[\frac{(x-l)^2}{4D_2(\tau-t)}\right] \right\}^{-1}$.

С целью проверки удовлетворения условиям (4) и (5), решение КЗ ($i = 2$) можно тождественно переписать в виде

$$C_2(x, \tau) = \frac{C_0}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{x-l}{2\sqrt{D_2(\tau-\tau_0)}}}^{\infty} \mu\left[\tau - \frac{(x-l)^2}{4D_2\eta^2}\right] e^{-\eta^2} d\eta, \quad x > l, \quad (12)$$

$$\text{где } \eta = \frac{x-l}{2\sqrt{D_2(\tau-t)}}, \quad d\eta = \frac{(x-l)d\tau}{4\sqrt{D_2(\tau-t)}^{3/2}}.$$

Отсюда уже видно, что при $\tau \rightarrow \tau_0$ и $x > 0$ удовлетворяется НУ (4), а при $x=l$ и $\tau > \tau_0$, с учетом значения интеграла Пуассона, удовлетворяется ГУ(5) или ГУ(10), найденное из решения КЗ при $i=1$.

4. Обсуждение

Проанализируем решение КЗ (1) при некоторых других условиях однозначности:

1. Если, например, НУ (2) задать в виде дельты функции Дирака, т.е. $C_1(x, \tau_0) = \delta(x)$ (т.е. $\tau = \tau_0$ и $x=0$ в установку вводится «погонная единица» диффундирующего вещества, которое при равномерном распределении по единице длины установки дает концентрацию равную единице), тогда решение КЗ ($i=1$) и $x < l$ будет фундаментальным решением ДУ нестационарной молекулярной диффузии

$$C_1(x, \tau) = G(x, 0, \tau, \tau_0) = \left\{ 2\sqrt{\pi D_1(\tau - \tau_0)} \exp \left[\frac{x^2}{4D_1(\tau - \tau_0)} \right] \right\}^{-1}, \quad (13)$$

интеграл КЗ ($i = 2$) и $x > l$ при условиях однозначности (4) и (5) запишется в виде

$$C_2(x, \tau) = (x-l) \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{G(l, 0, t, \tau_0) G(x, l, \tau, t)}{(\tau - t)} dt, \quad (14)$$

где $G(l, 0, t, \tau_0) = C_1(l, \tau) = C_2(l, \tau) = \mu(\tau)$.

В процессе отыскания $C_2(x, \tau)$ возникают определенные сложности, связанные с необходимостью численно вычислять несобственные интегралы.

2. Если вместо непроницаемости ГУ (3) задать ГУ в виде $C_1(x_1, \tau) = C_w = \text{const}$, т.е. на границе $x = x_1$ вводить жидкость с постоянно-заданной концентрацией взвешенных частиц, то решением КЗ $i=1$ будет

$$C_1(x, \tau) = C_w \operatorname{erfc} \eta + \frac{C_0}{2} \{ \Phi(\eta_{x_1}) - \Phi(\eta_{x_2}) - \Phi(\eta_{-x_2}) + \Phi(\eta_{-x_1}) \}, \quad (15)$$

где $\operatorname{erfc} \eta$ – дополнительная функция ошибок Гаусса [15, 16],

$$\eta_{x_i} = \frac{x-x_i}{2\sqrt{D_2(\tau-t)}}, \quad \eta_{-x_i} = \frac{x+x_i}{2\sqrt{D_2(\tau-t)}}, \quad (i=1, 2).$$

При $x_1 = 0$ и $x_2 = l$ следует

$$C_1(x, \tau) = C_w \operatorname{erfc} \eta + C_0 \operatorname{erf} \eta - \frac{C_0}{2} \left\{ \Phi \left[\frac{x-l}{2\sqrt{D_1(\tau-\tau_0)}} \right] + \Phi \left[\frac{x+l}{2\sqrt{D_1(\tau-\tau_0)}} \right] \right\}. \quad (16)$$

С учетом ГУ сопряжения (5) при $x = l$ получим

$$C_1(l, \tau) = C_2(l, \tau) = \mu(\tau) = C_w \operatorname{erfc} \eta,$$

здесь $\eta = \frac{l}{2\sqrt{D_1(\tau-\tau_0)}}$.

3. Если при постоянстве ГУ, НУ задать обобщенной функцией Дирака, т.е.

$C_1(x, \tau_0) = \delta(x, x_1)$, то решение (15) примет вид

$$C_1(x, \tau) = C_w \operatorname{erfc} \eta + G(x, x_1, \tau, \tau_0) - G(x, -x_1, \tau, \tau_0), \quad (17)$$

а при $x_1 = 0$ и $x_2 = l$ следует

$$C_1(l, \tau) = C_w \operatorname{erfc} \eta_l,$$

которое является ГУ «склеивания» для КЗ ($i = 2$)

$$C_2(l, \tau) = C_1(l, \tau) = \mu(\tau).$$

В этом случае (11) решение КЗ при $i = 2$ будет

$$C_2(x, \tau) = C_w(x - l) \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{\operatorname{erfc} \eta_l}{(\tau - t)} G(x, l, \tau, t) dt, \quad x > l. \quad (18)$$

Анализ (11) и (12) показывает, что при достаточно больших τ , концентрация $C_2(x, \tau)$ взвешенных коллоидных частиц после прохождения соответствующей фильтрации на КВПУ стремится к нулю.

Найденные аналитические решения КЗ позволяют с помощью матанализа экстремальных значений оптимизировать и автоматизировать процессы обессоливания воды в КВПУ, которые приводят к снижению энергопотребления и себестоимости очищенной воды для систем водо- и теплоснабжения в теплоэнергетических установках.

Рассмотренная физико-математическая модель может быть использована при решении КЗ тепло- и массообмена для многослойных конструкций зданий, систем тепло- и водоснабжения, а также транспортных сооружений и дорог [17-20].

Для масштабных переходов, постановку и аналитические решения КЗ ($i=1,2$) при рассмотренных различных условиях однозначности, можно также записать в критериальном виде как изменение относительной концентрации от массообменного критерия Фурье ($Fo_{im} = \frac{D_i \tau}{x^2}$).

5. Заключение

1. Формализована физико-математическая модель процесса опреснения грунтовых вод в КВПУ.
2. Получены аналитические замкнутые решения КЗ нестационарного диффузионного переноса для кусочно-однородных сред при различных исходных условиях однозначности и нестационарных, несимметричных краевых условиях на поверхностях контакта неоднородных сред.
3. Разработанная ММ процесса опреснения воды в КВПУ может быть использована для выбора ее оптимальных параметров, режимов и условий работы, что позволит снизить энергозатраты и себестоимость обессоленной воды при эксплуатации КВПУ для систем водо- и теплоснабжения в теплоэнергетических установках.
4. Полученные аналитические решения КЗ позволяют путём нахождения экстремальных значений оптимизировать процессы очистки воды в комбинированной водоподготовительной установке (КВПУ) и могут быть тестовыми КЗ при численном решении более сложных нелинейных КЗ несвязанного и взаимосвязанного тепло- и массопереноса.
5. Оптимальные значения по требуемым значениям независимых параметров аналитических решений КЗ могут быть использованы в контроллерах АСУТП при выборе энергоресурсосберегающих режимов управления.
6. Представленная ММ может быть также использована при решении КЗ тепло- и массообмена для многослойных ограждающих конструкций зданий и сооружений, систем трубопроводов водо- и теплоснабжения, многослойных дорожных одежд.

7. Для масштабных переходов постановка и аналитические решения КЗ можно легко записать в безразмерном виде, как изменение относительной концентрации от массообменного критерия Фурье.

Список литературы

1. Krishnamoorthy S., Modera M., Harrington, C. Efficiency optimization of a variable-capacity/variable-blower-speed residential heat-pump system with ductwork // *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 150. P. 294–306. DOI:10.1016/j.enbuild.2017.05.066
2. Kang Z., Zhou X., Zhao Y., Wang R., Wang X. Study on Optimization of Underground Water Source Heat Pump // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 205. P. 1691–1697. DOI:10.1016/j.proeng.2017.10.353
3. Janghorban Esfahani I., Lee S., Yoo C. Evaluation and optimization of a multi-effect evaporation–absorption heat pump desalination based conventional and advanced exergy and exergoeconomic analyses // *Desalination*. 2015. Vol. 359. P. 92–107. DOI:10.1016/j.desal.2014.12.030
4. Parham K., Khamooshi M., Daneshvar S., Assadi M., Yari M. Comparative assessment of different categories of absorption heat transformers in water desalination process // *Desalination*. 2016. Vol. 396. P. 17–29. DOI:10.1016/j.desal.2016.05.031
5. Junusova L., Chicherin S. Wastewater treatment and application in the advanced Nanofil traction system: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. Sustainable and Efficient Use of Energy, Water and Natural Resources / IOP Publishing, Sevan, 2019. P. 131–134.
6. Junusova L. The impact of technological characteristics of membrane devices for the degree of desalination water treatment plant in the schemes VII Science, Technology and Higher Education : materials of the III International research and practice conference / Westwood, Canada, April 2-3, 2015. P. 251–256.
7. Junusova L.R. Installation for receiving drinking water. Innovative patent for invention No. 29944, Bulletin. No. 6 dated June 15, 2015 Committee on Intellectual Property Rights Min. Yust. RK.
8. Junusova L.R. Utility model patent FAP No. 01327 Intellectual Property Agency of the Republic of Uzbekistan dated 09.26.2018.
9. Chicherin S.V. The Analysis of Design Arrangements Associated with a Measuring Points Location of the Pipe Surveillance System. Automation and IT in Power Engineering. 2017. No. 12. 12–15 pp.
10. Junusova L.R. Membrane Plants In Water Conditioning Schemes At Thermal Power Stations // *Journal of European Applied Sciences*. Germany, Stuttgart. 2015. Vol. 4. P. 60–63.
11. Ortega Sandoval A. D., Barbosa Brião V., Cartana Fernandes V. M., Hemkemeier A., Friedrich M. T. Stormwater management by microfiltration and ultrafiltration treatment // *Journal of Water Process Engineering*. 2017. Vol. 30. P. 1–11. DOI:10.1016/j.jwpe.2017.07.018
12. Зельдович Я. Б., Мышкис А. Д. Элементы прикладной математики. М.: Наука, 1965. 616 с.
13. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М.: изд-во МГУ, 1999. 736 с.
14. Бермант А. Ф., Араманович И. Г. Краткий курс математического анализа. Спб.: изд-во «Лань», 2005. 736 с.
15. Прудников А. П., Брычков Ю. А., Маричев О. И. Интегралы и ряды. Специальные функции. М.: Наука, 1983. 752 с.
16. Письменный Д. Т. Конспект лекций по высшей математике. М.: Айрис-пресс, 2019. 608 с.
17. Карташов Э. М., Кудинов В. А., Калашников В. В. Теория тепломассопереноса: решение задач для многослойных конструкций. М.: изд-во «Юрайт», 2019. 435 с.
18. Садыков Р. А. Обобщенная математическая модель процессов переноса в многослойных ограждающих конструкциях зданий и сооружений. XX Международный конгресс «Энергоэффективность XXI век. Инженерные методы снижения энергопотребления зданий». М., 2016. 34–38 с.

19. Садыков Р. А., Крайнов Д. В., Иванова Р. В. Теплозащитные свойства ограждающих конструкций при наличии стоков или источников теплоты и фильтрации воздуха // Научно-технический журнал. М.: Вестник МГСУ, 2011. № 7. 174-180 с.

20. Беляев Н. М., Рядно А. А. Методы теории теплопроводности. В 2-х частях. М.: Высшая школа, 1982. Ч. I – 372 с., Ч. II - 304 с.

References

1. Krishnamoorthy S., Modera M., Harrington, C. Efficiency optimization of a variable-capacity/variable-blower-speed residential heat-pump system with ductwork // *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 150. P. 294–306. DOI:10.1016/j.enbuild.2017.05.066
2. Kang Z., Zhou X., Zhao Y., Wang R., Wang X. Study on Optimization of Underground Water Source Heat Pump // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 205. P. 1691–1697. DOI:10.1016/j.proeng.2017.10.353
3. Janghorban Esfahani I., Lee S., Yoo C. Evaluation and optimization of a multi-effect evaporation–absorption heat pump desalination based conventional and advanced exergy and exergoeconomic analyses // *Desalination*. 2015. Vol. 359. P. 92–107. DOI:10.1016/j.desal.2014.12.030
4. Parham K., Khamooshi M., Daneshvar S., Assadi M., Yari M. Comparative assessment of different categories of absorption heat transformers in water desalination process // *Desalination*. 2016. Vol. 396. P. 17–29. DOI:10.1016/j.desal.2016.05.031
5. Junusova L., Chicherin S. Wastewater treatment and application in the advanced Nanofil traction system: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. Sustainable and Efficient Use of Energy, Water and Natural Resources / IOP Publishing. Sevan, 2019. P. 131-134.
6. Junusova L. The impact of technological characteristics of membrane devices for the degree of desalination water treatment plant in the shemes VII Science, Technology and Higher Education : materials of the III International research and practice conference / Westwood, Canada, April 2-3, 2015. P. 251-256.
7. Junusova L.R. Installation for receiving drinking water. Innovative patent for invention No. 29944, Bulletin. No. 6 dated June 15, 2015 Committee on Intellectual Property Rights Min. Yust. RK.
8. Junusova L.R. Utility model patent FAP No. 01327 Intellectual Property Agency of the Republic of Uzbekistan dated 09.26.2018.
9. Chicherin S.V. The Analysis of Design Arrangements Associated with a Measuring Points Location of the Pipe Surveillance System. *Automation and IT in Power Engineering*. 2017. No. 12. 12-15 pp.
10. Junusova L.R. Membrane Plants In Water Conditioning Schemes At Thermal Power Stations // *Journal of European Applied Sciences*. Germany, Stuttgart. 2015. Vol. 4. P. 60-63.
11. Ortega Sandoval A. D., Barbosa Brião V., Cartana Fernandes V. M., Hemkemeier A., Friedrich M. T. Stormwater management by microfiltration and ultrafiltration treatment // *Journal of Water Process Engineering*. 2017. Vol. 30. P. 1-11. DOI:10.1016/j.jwpe.2017.07.018
12. Zeldovich Ya. B., Myshkis A.D. Elements of applied mathematics. M.: Nauka, 1965. 616 p.
13. Tikhonov A. N., Samarskiy A. A. Equations of mathematical physics. M: MGU Publishing House, 1999. 736 p.
14. Bermant A. F., Aramanovich I. G. A short course in mathematical analysis. SPb.: Publishing House "Lan", 2005. 736 p.
15. Prudnikov A. P., Brychkov Yu. A., Marichev O. I. Integrals and series. Special functions. M.: Nauka, 1983. 752 p.
16. Pismenny D. T. Lecture notes on higher mathematics. M.: Airis-press, 2019. 608 p.
17. Kartashov E. M., Kudinov V. A., Kalashnikov V. V. Theory of heat and mass transfer: solution of problems for multilayer structures. M.: Publishing House "Yurayt", 2019. 435 p.
18. Sadykov R.A. Generalized mathematical model of transport processes in multilayered enclosing structures of buildings and structures. XX International Congress "Energy Efficiency XXI century. Engineering methods to reduce energy consumption in buildings". M. 2016. 34-38 p.

19. Sadykov R. A., Kraynov D. V., Ivanova R. V. Thermal protection properties of enclosing structures in the presence of effluents or heat sources and air filtration // Scientific and Technical Journal. M.: Vestnik MGSU, 2011. № 7. 174-180 pp.

20. Belyaev N. M., Ryadno A. A. Methods of the Theory of Heat Conduction. In 2 parts. M.: Vysshaya Shkola, 1982. P. I - 372 p., P. II - 304 p.

Информация об авторах

Ренат Ахатович Садыков, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: sadykov_r_a@mail.ru

Аида Камилевна Мухаметзянова, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: aidamukham@gmail.com

Ляззат Рысхановна Джунусова, кандидат технических наук, доцент, Алматинский университет энергетики и связи, г. Алматы, Республика Казахстан

Email: dzhunusova@mail.ru

Алия Аликовна Елеманова, доцент, Алматинский университет энергетики и связи, г. Алматы, Республика Казахстан

Email: a_liya83@mail.ru

Information about the authors

Renat A. Sadykov, doctor of technical sciences, professor Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: sadykov_r_a@mail.ru

Aida K. Mukhamezianova postgraduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: aidamukham@gmail.com

Lyazzat R. Junussova, candidate of technical sciences, associate professor Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan

Email: dzhunusova@mail.ru

Aliya A. Elemenova, associate professor, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan

Email: a_liya83@mail.ru

DOI: 10.52409/20731523_2022_1_90

УДК 621.1

Аналитический и численный расчеты квазиустановившегося режима теплопереноса в ограждающих конструкциях зданий и сооружений

Р.А.Садыков¹, А.К. Мухаметзянова¹, С.А.Филимонова²

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет
Казань, Российская Федерация.

²ООО «Метрополис»
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация: в реальных условиях эксплуатации зданий и сооружений все процессы переноса протекают при неустановившихся режимах, что связано с непрерывными изменениями параметров состояния наружного воздуха (сезонные, суточные и более короткие по времени колебания), тепловыделениями и аккумуляцией теплоты и влаги в помещениях в результате функциональных процессов и работы инженерно-экологических систем жизнеобеспечения зданий и сооружений (кондиционирования, вентиляции, отопления и др.). Поэтому исследования нестационарных и квазистационарных режимов переноса в ограждающих конструкциях зданий и сооружений имеет прямое практическое приложение и является актуальной проблемой современности.

Целью исследования является физико-математическое описание квазиустановившегося процесса кондуктивного теплопереноса через ограждающие конструкции зданий при периодическом изменении температуры наружного воздуха и обобщение полученных аналитических и численных решений краевой задачи и проведенных теплотехнических расчетов для любых других ограждающих конструкций и климатических зон. Задачами исследования являются аналитическое решение нестационарных и квазистационарных краевых задач и написание соответствующих алгоритмов для расчета полей температур в ограждающих конструкциях в ПО Mathcad и Microsoft Excel, а также численное моделирование нестационарного и квазистационарного кондуктивного переноса в программных обеспечениях Elcut.

Основные результаты исследования состоят в том, что авторами были формализованы математические модели краевой задачи нестационарного и квазистационарного теплопереноса, по которым написаны расчетные программы в ПО Mathcad и Microsoft Excel. Корректность постановки краевой задачи и алгоритмов расчета определена путем сравнения аналитических решений с результатами вычислений в программных обеспечениях Elcut и Ansys Fluent. Также было установлено, что расчёт многослойной ограждающей конструкции при экстремальных значениях температур наружного воздуха в стационарных режимах необходим, но для получения объективной оценки энергоэффективности строительных конструкций требуется выполнение расчетов и при неустановившихся режимах эксплуатации зданий и сооружений, которые точнее отражают реальные процессы тепло- и массопереноса в них, учитывая амплитуду колебания температур наружного воздуха.

В работе исследовано изменение температуры ограждающих конструкций зданий и сооружений в течение суток и формализована математическая модель для переходного процесса теплопереноса через однослойную ограждающую конструкцию. Также было проведено исследование квазистационарного переноса теплоты через ограждающую конструкцию аналитическим и численным методами и приведены теплотехнические расчеты, которые применимы для любых ограждающих конструкций и климатических зон.

Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что в условиях интенсивного развития строительной индустрии и повышения её эффективности, связанной с разработкой новых технологий, снижением материальных и

энергетических затрат на производство строительных материалов, остро встает вопрос учёта нестационарности процессов тепло- и массопереноса при теплотехнических расчетах различных ограждающих конструкций.

Ключевые слова: математическая модель, ограждающая конструкция, краевая задача, теплоперенос, расчет, режим, тепловая волна.

Для цитирования: Р.А.Садыков, А.К. Мухаметзянова, С.А.Филимонова. Аналитический и численный расчеты квазиустановившегося режима теплопереноса в ограждающих конструкциях зданий и сооружений//Известия КГАСУ 2022 №1(59). С 90-102.

DOI: 10.52409/20731523_2022_1_90

Analytical and numerical calculations of the quasi-steady-state heat transfer mode in the enclosing structures of buildings and structures

R.A.Sadykov¹, A.K. Mukhamezianova¹, S.A. Filimonova²

¹Kazan State University of Architecture and Engineering

Kazan, Russian Federation

²LLC "Metropolis"

Moscow Russian Federation

Abstract: In real operating conditions of buildings and constructions, all transfer processes proceed under unsteady modes, which is associated with continuous changes in the parameters of the state of the outside air (seasonal, daily and shorter in time fluctuations), heat release and accumulation of heat and moisture in rooms as a result of functional processes and work of engineering and ecological systems of building and construction functioning (air conditioning, ventilation, heating, etc.). Therefore, the study of unsteady and quasi-steady transfer modes of buildings and constructions in the enclosing structures has a direct practical application and it is an urgent problem of our time.

The aim of the study is physical and mathematical description of the quasi-steady process of conductive heat transfer through the enclosing structures of buildings with a periodic change in the outside air temperature and generalization of the obtained analytical and numerical solutions of the boundary value problem and the performed heat engineering calculations for any other enclosing structures and climatic zones. The objectives of the study are the analytical solution of unsteady and quasi-steady boundary value problems and the writing of the corresponding algorithms for calculating the temperature fields in the enclosing structures in the Mathcad and Microsoft Excel software, as well as the numerical modeling of the unsteady and quasi-steady conductive transfer in the Elcut and Ansys Fluent software.

The main results of the research are that the authors formalized mathematical models of the boundary value problem of unsteady and quasi-steady heat transfer, which were used to create computational programs in Mathcad and Microsoft Excel software. The correctness of the statement of the boundary value problem and the calculation algorithms was determined by comparing analytical solutions with the results of calculations in the Elcut and Ansys Fluent software. It was also found that the calculation of a multilayer enclosing structure at extreme values of outside air temperatures in steady modes is necessary, but to obtain an objective assessment of the energy efficiency of building constructions, calculations are also required under unsteady modes of operation of buildings and constructions, which more accurately reflect the real processes of heat and mass transfer in them, taking into account the amplitude of fluctuations in outside temperatures.

The paper investigates the change in the temperature of the enclosing structures of buildings and constructions during the day and formalizes a mathematical model for the transfer process of heat transfer through a single-layer enclosing structure. Also, a study of quasi-steady heat transfer through the enclosing structure was carried out using analytical and numerical methods,

and heat engineering calculations applicable for any enclosing structures and climatic zones were presented.

The significance of the results obtained for the construction industry lies in the fact that in the conditions of the intensive development of the construction industry and an increase in its efficiency associated with the development of new technologies, a decrease in material and energy costs for the production of building materials, the issue of taking into account the unsteadiness of heat and mass transfer processes in heat engineering calculations of various enclosing structures becomes urgent.

Keywords: mathematical model, enclosing structure, boundary value problem, heat transfer, calculation, mode, heat wave.

For citation: Sadykov R.A., Mukhamezianova A.K., Filimonova S.A. Analytical and numerical calculations of the quasi-steady-state heat transfer mode in the enclosing structures of buildings and structures//News KSUAE 2022 №1(59). С 90-102. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_90

1. Введение

Одной из актуальных проблем современности является поиск и создание простых в реализации и надежных методов теплового расчета многослойных ограждающих конструкций (ОК) зданий, оценки их теплофизических свойств, а также расчета их энергоресурсоэффективности [1-6].

Теплофизические свойства применяемых многослойных ОК существенно влияют на тепловой и воздушный режимы здания, а также на работу инженерных систем здания (отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха) [7-9], на которые затрачивается основное количество тепловой энергии.

Проектирование ОК и расчет необходимого сопротивления теплопередаче, а также последовательность расположения конструктивных слоев, при которых обеспечивается требуемый режим эксплуатации здания, ведется только при стационарных режимах переноса [10,11]. Однако, в реальных условиях эксплуатации зданий и сооружений, процессы тепломассопереноса через ОК практически всегда протекают в нестационарном и квазистационарном режимах [12-17], что часто приводит к значительному изменению свойств ОК. Поэтому исследование нестационарности процессов переноса в ОК является актуальной задачей.

В строительной теплотехнике одной из задач, требующих учета нестационарности теплопереноса, является расчет затухания температурных колебаний в толще ОК в связи с колебаниями температуры наружного воздуха и под воздействием солнечного излучения. Поэтому решаемая задача является актуальной, т. к. суточные изменения температуры атмосферного воздуха могут достигать больших значений в различные периоды года и оказывать значительное влияние на теплозащитные характеристики и свойства материалов ОК зданий и сооружений.

Целью исследования является физико-математическое описание квазиустановившегося процесса кондуктивного теплопереноса через ограждающие конструкции зданий при периодическом изменении температуры наружного воздуха и обобщение полученных аналитических и численных решений краевой задачи и проведенных теплотехнических расчетов для любых других ограждающих конструкций и климатических зон. Задачами исследования являются аналитическое решение нестационарных и квазистационарных краевых задач и написание соответствующих алгоритмов для расчета полей температур в ограждающих конструкциях в ПО Mathcad и Microsoft Excel, а также численное моделирование нестационарного и квазистационарного кондуктивного переноса в программных обеспечениях Elcut.

2. Материалы и методы

Математическая модель (ММ) процесса.

Рассмотрим процесс передачи теплоты через однослойную стенку толщиной δ . В ММ принимается, что изменение температуры по толщине (x) рассматриваемой стенки

много больше, чем по ее высоте (z) и ширине (y), т. е. $\frac{\partial t}{\partial x} \neq 0$, а $\frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\partial t}{\partial z} \approx 0$.

Предполагается также, что теплофизические характеристики ОК постоянны и она представляет собой кусочно-однородное сплошное тело.

Поле температур ОК зданий за сутки подчиняется закону простого гармонического колебания температуры на наружной поверхности (в дневные часы температура на наружной поверхности ОК и плотность теплового потока выше, а в ночные – ниже) [18, 19]. Например, изменение температуры во времени наружной поверхности ОК в течение суток может быть описано периодическим законом косинуса:

$$t(0, \tau) = t_n(\tau) = t_{cp} + t_A \cos \omega \tau,$$

где t_{cp} – средняя температура на поверхности ОК, t_A – амплитуда колебаний температуры на поверхности ОК; $\omega = \frac{2\pi n}{\tau_0}$ – циклическая частота (период/час) колебаний температуры поверхности, τ_0 – полный период колебаний.

Колебания температуры около значения t_{cp} на поверхности и на глубине x показаны на рис. 1, иллюстрирующем амплитуды t_A и t_{0x} и период колебания $\tau_0 = \frac{2\pi}{\omega}$.

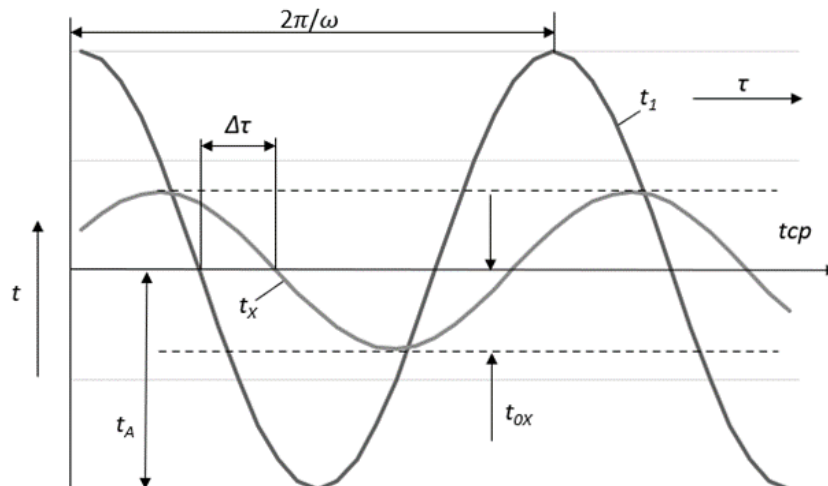


Рис. 1. Характеристики температурной волны в ОК (t_1 – температура на наружной поверхности ОК; t_x – температурная волна в толще ОК; $\Delta\tau$ – время запаздывания температурной волны)

Температуру на внутренней поверхности ограждения, поддерживаемую за счет работы системы отопления, можно считать постоянной.

$$t(\delta, \tau) = t_b = \text{const.}$$

Таким образом, квазистационарный перенос количества теплоты, проходящей через ОК можно рассчитать с помощью решения дифференциального уравнения (ДУ) молекулярного переноса с граничными условиями (ГУ) в следующем виде:

$$\begin{cases} t_\tau = at_{xx}, & x \in (0, \delta), \tau > 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} t(0, \tau) = f(\tau) = t_n = t_{cp} + t_A \cos \omega \tau, \tau > 0, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} t(\delta \rightarrow \infty, \tau) = t_\infty = t_b \neq \infty, \tau > -\infty, \end{cases} \quad (3)$$

где a – коэффициент температуропроводности материала.

Если процесс теплового колебания на наружной поверхности ОК здания продолжается достаточно долго, то устанавливается квазиустановившийся режим и начальные условия (НУ) не отражаются на изменении $t(x, \tau)$ [20]. Поэтому НУ в таких процессах не рассматриваются.

По рассмотренной методике, был произведен расчет температурных полей в различных сечениях фактурного слоя ОК в течении одних суток.

В качестве примера исследуемой ОК, была выбрана кирпичная стена толщиной $\delta=0,51\text{м}$ с теплотехническими характеристиками: $\lambda=0,75\text{ Вт/м}^\circ\text{С}$, $\rho=1800\text{ кг/м}^3$, $c=880\text{ Дж/кг}^\circ\text{С}$.

За расчетный период выбрана дата 09.08.2020 г. Казань (аналогично могут быть рассчитаны поля температур для любой другой ОК, любой даты и любого другого местоположения). Начальная средняя температура наружного воздуха и температура воздуха внутри здания одинаковы и равны 18°С , амплитуда колебаний температуры наружного воздуха составляет $4,8^\circ\text{С}$, максимум температуры ($22,8^\circ\text{С}$) наблюдается в 15:00 (рис. 3а).

Численное моделирование квазистационарного режима в ОК.

В ПО Elcut создана 2d геометрия однослойной кирпичной стены и автоматически построена сетка, заданы теплотехнические характеристики рассматриваемого материала – кирпича и ГУ на наружной и внутренней поверхностях.

Колебания температуры наружного воздуха для г. Казань аппроксимированы гармонической функцией, она является граничным условием при численном расчете КЗ, который представлен ниже:

$$t_{\text{ж}} = 18 + 4,8 \cdot \cos[360 \cdot (\tau + 32400)/86400].$$

3. Результаты

Решение краевой задачи (КЗ) без начальных условий (1)-(3) можно найти методом Фурье [21, 22], представляя поле температур в виде:

$$t(x, \tau) = F(\tau) \cdot G(x). \quad (4)$$

Поскольку изменение температуры должно быть гармоническим, необходимо, чтобы переменные входили в аргументы некоторой тригонометрической функции. Это достигается путем представления решения для $F(\tau)$ в виде экспоненты с мнимым показателем. После дифференцирования (4) по x и τ , и подстановки в (1), следует:

$$\frac{F_\tau}{aF(\tau)} = \frac{G_{xx}}{G(x)}. \quad (5)$$

Чтобы функция (4) была интегралом (1), равенство (5) должно быть для всех значений x и τ .

Фиксируя, например, некоторое значение x и меняя τ , следует, что правая и левая части равенства (5) при изменении своих аргументов сохраняют постоянное значение:

$$\frac{F_\tau}{aF(\tau)} = \frac{G_{xx}}{G(x)} = \pm ik^2, \quad (6)$$

где $k = \text{const}$; $i = \sqrt{-1}$ мнимая единица, которую можно представить в виде: $i = (i + 1)^2/2$.

Из соотношения (6) следует два независимых обыкновенных ДУ, для нахождения функций $F(\tau)$ и $G(x)$:

$$F_\tau \pm ik^2 aF(\tau) = 0, \quad (7)$$

$$G_{xx} \pm ik^2 G(x) = 0. \quad (8)$$

Из решения (7) и (8), с учетом (4) получим:

$$t(x, \tau) = C \cdot \exp(\pm ik^2 a \tau) \cdot \exp(\pm ik^2 \sqrt{ix}). \quad (9)$$

Физически возможное решение (9), при котором температура бесконечно не возрастает с ростом x , получит вид:

$$t(x, \tau) = \exp(-kx\sqrt{1/2}) \left\{ C_1 \cdot \exp[i(k^2 a \tau - kx\sqrt{1/2})] + C_2 \cdot \exp[-i(k^2 a \tau - kx\sqrt{1/2})] \right\}. \quad (10)$$

Используя формулу Эйлера, решение (10) записывается через тригонометрические функции:

$$t(x, \tau) = \exp(-kx\sqrt{1/2}) \cdot [A \cdot \cos(k^2 a \tau - kx\sqrt{1/2}) + B \cdot \sin(k^2 a \tau - kx\sqrt{1/2})], \quad (11)$$

или через фазовый угол φ (11) будет:

$$t(x, \tau) = C \cdot \exp(-kx\sqrt{1/2}) \cdot \cos(k^2 a \tau - kx\sqrt{1/2} - \varphi), \quad (12)$$

где

$$\varphi = \arctg \frac{B}{A}, \quad C = \sqrt{A^2 + B^2},$$

здесь постоянные A , B и k находятся из ГУ. Периодическую функцию температуры $t(0, \tau) = f(\tau)$ можно разложить в ряд Фурье:

$$t(0, \tau) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cdot \cos \frac{2\pi n \tau}{\tau_0} + b_n \cdot \sin \frac{2\pi n \tau}{\tau_0} \right), \quad (13)$$

уравнение (11) при ГУ $x=0$, принимает вид:

$$t(0, \tau) = A \cdot \cos(k^2 a \tau) + B \cdot \sin(k^2 a \tau), \quad (14)$$

где $A = a_n = t_0$ – амплитуда температуры на поверхности ОК; $k = \sqrt{2\pi n / \tau_0 a}$; $B = b_n = 0$, т.к. в ГУ (2) задана функция косинуса.

В (13) $a_0/2$ – средняя температура на поверхности при $x=0$, не входит в решение. Этот член обычно является средней величиной колеблющейся температуры при $x=0$ и является результатом начальной неравномерности в момент времени $\tau = 0$.

Подставляя значения неизвестных в уравнение (11) с учетом (13), получим следующее решение КЗ (1)-(3):

$$t(x, \tau) = t_{cp} + t_0 \cdot \exp\left(-x \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{2\pi n}{\tau_0 a}}\right) \cdot \left[\cos\left(\frac{2\pi n}{\tau_0} \tau - x \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{2\pi n}{\tau_0 a}}\right) \right], \quad (15)$$

или

$$t(x, \tau) = t_{cp} + t_0 \cdot \exp(-x\sqrt{\omega/2a}) \cdot \left[\cos(\omega\tau - x\sqrt{\omega/2a}) \right]. \quad (16)$$

Полученное решение КЗ применимо для плоской стенки, при условии, что температурные волны не достигают ее противоположной поверхности, т.е. отсутствует взаимное наложение температурных волн, направленных с противоположных сторон.

Для масштабных переходов уравнение (16) можно переписать в критериальной записи:

$$\theta = \exp\left(-\sqrt{\pi/F_{0x}}\right) \cdot \cos\left(2\pi \frac{\tau}{\tau_0} - \sqrt{\frac{\pi}{F_{0x}}}\right), \quad (17)$$

где $\theta = (t - t_{cp})/t_A$ – безразмерная температура; $F_{0x} = \alpha\tau/x^2$ – теплообменный критерий Фурье;

Для расчета тепловых потоков и энергосбережения в зданиях и сооружениях можно найти параметр средней температуры $\bar{\theta}$, который находится интегрированием (17) от 0 до 1:

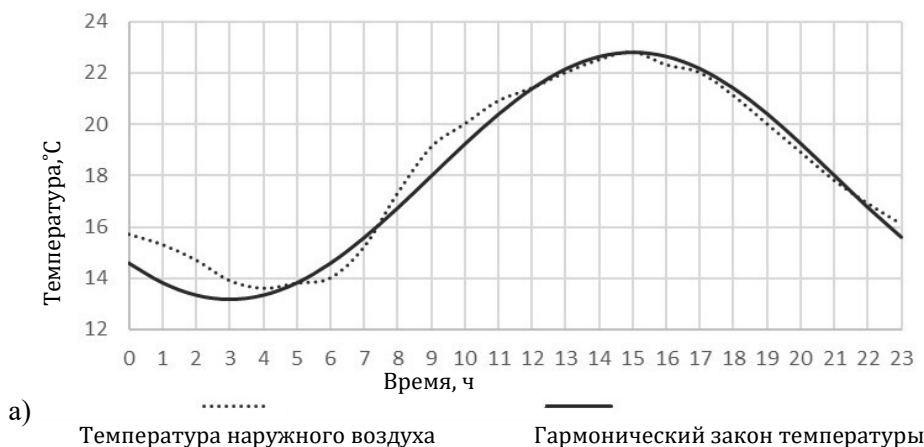
$$\bar{\theta} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F_{0x}}{\pi}} \cdot \left\{ \sin\left(2\pi \frac{\tau}{\tau_0}\right) + \cos\left(2\pi \frac{\tau}{\tau_0}\right) - \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{F_{0x}}}\right) \cdot \sin\left(2\pi \frac{\tau}{\tau_0} - \sqrt{\frac{\pi}{F_{0x}}}\right) + \cos\left(2\pi \frac{\tau}{\tau_0} - \sqrt{\frac{\pi}{F_{0x}}}\right) \right\}. \quad (18)$$

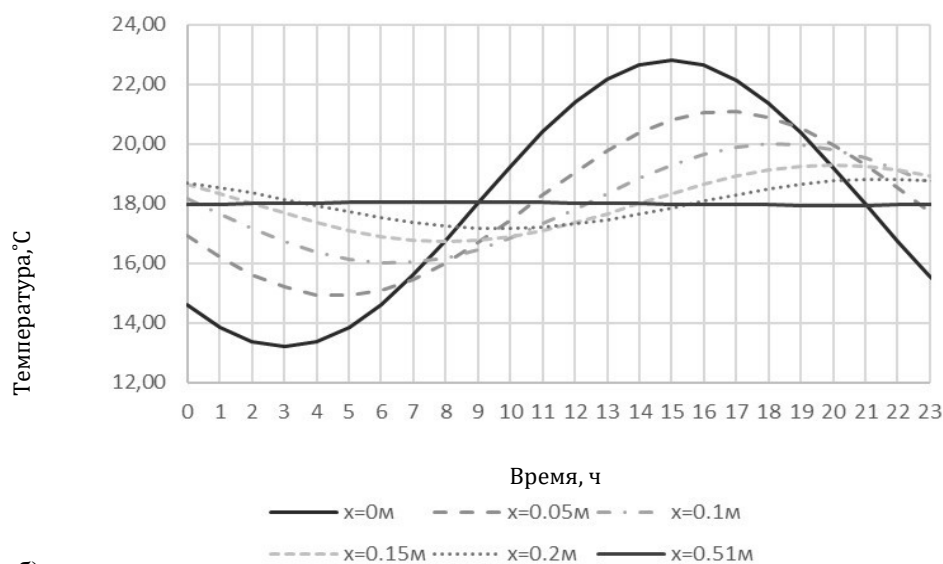
Для определения напряжений в ОК можно из (17) дифференцированием по x найти теплотехнический параметр градиента температуры G :

$$G = \sqrt{\frac{\pi}{F_{0x}}} \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{F_{0x}}}\right) \cdot \left[\sin\left(2\pi \frac{\tau}{\tau_0} - \sqrt{\frac{\pi}{F_{0x}}}\right) + \cos\left(2\pi \frac{\tau}{\tau_0} - \sqrt{\frac{\pi}{F_{0x}}}\right) \right]. \quad (19)$$

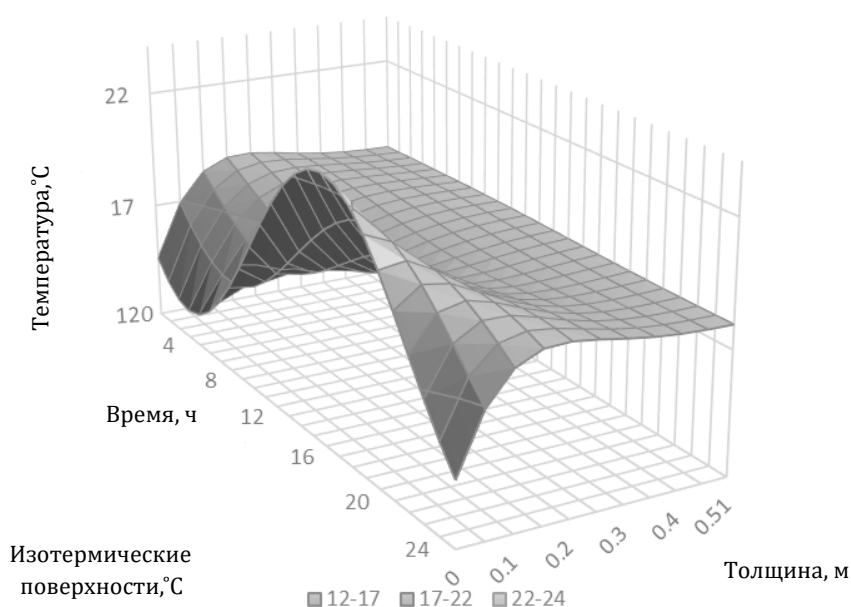
Графическое представление аналитического решения КЗ (1)-(3) на примере расчета поля температур в ОК.

Результаты аналитического расчета затухания температурной волны в стене с течением времени на различной глубине показаны на рис. 2б и 2в.





б)



в)

Рис. 2. а) Значения температуры наружного воздуха в каждый час рассматриваемого интервала времени в г. Казань 09.08.2020; б) Изменение по времени суток температуры поверхности стены в различных ее сечениях; в) Рельеф дневной температурной волны в однослойной кирпичной стене

В результате численных расчетов получены значения температур на различной глубине в течение 24 часов, они представлены на рис. 3а [изменение $t(x)$ через фиксированное время] и 3б [изменение $t(\tau)$ на различной глубине]:

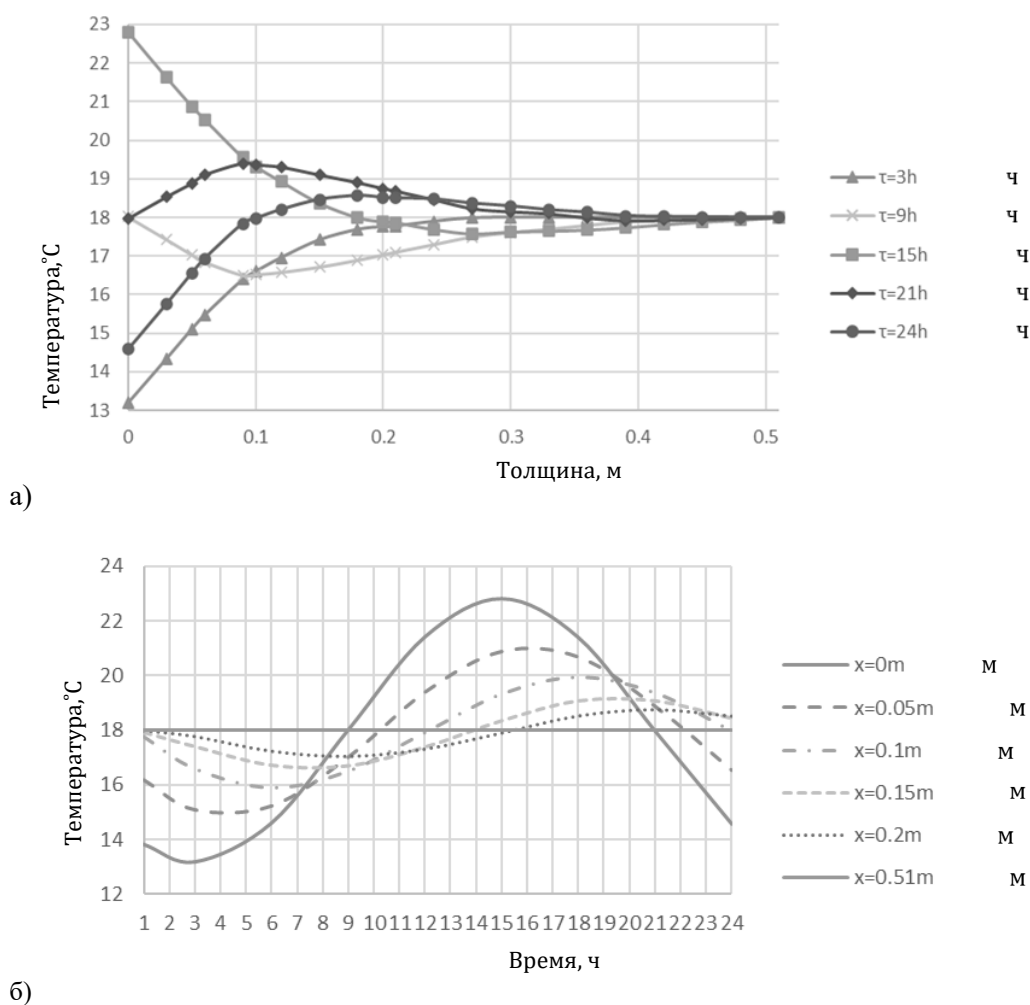


Рис. 3. а) Затухание температурной волны по толщине стены в разное время суток;
б) Изменение по времени суток температуры стены на различной глубине

Таким образом, по результатам численного исчисления найдены поля температур и тепловых потоков на различной глубине ОК в любой момент рассматриваемого периода времени. Например, температура на глубине 0.2м через 9ч 30мин равна 17.14°C.

4. Обсуждение

Таким образом, по рассмотренному аналитическому решению, можно определить значение температуры на любой глубине ОК в различное время суток. Например, значение температуры стены на глубине 0.2 м через 9 часов 30 минут после начала теплового процесса равно 17.17°C.

Результаты полученных исследований приводят к следующему обобщению: распространение температурной волны в ОК подчиняется трем основным законам Фурье, т.е. если температура на поверхности длительное время изменяется по гармоническому закону, то в объеме ОК также устанавливаются колебания температуры с тем же периодом, причем амплитуда колебаний температуры экспоненциально убывает с глубиной

$$t_A(x) = t_A \cdot \exp(-x\sqrt{\omega/2a}), \quad (20)$$

Следовательно, если глубины растут в арифметической прогрессии, то амплитуды колебаний температуры, согласно первому закону Фурье, растут в геометрической прогрессии.

Момент времени, когда температура поверхности впервые достигает среднего значения t_{cp} , приходится на время, когда $\cos \omega t = 0$, или на время $\tau_{x=0} = \pi/2\omega$. Аналогично на глубине x температура $t_{cp,x}$ впервые достигается тогда, когда

$\cos\left(\omega\tau - \sqrt{\frac{\omega}{2a}}x\right) = 0$, или в момент времени $\tau = \pi/2\omega + x\sqrt{1/2a\omega}$. Этот момент наступает позднее, чем на поверхности, на величину $\Delta\tau$ (рис. 1), равную:

$$\Delta\tau = \sqrt{0.5\omega}x = 0.5x\sqrt{P/\pi a}, \quad (21)$$

которая, в соответствии со вторым законом Фурье, называется временем запаздывания (релаксации) температурной волны.

Согласно третьему закону Фурье, глубина проникновения тепла в толщу ограждения зависит от периода колебаний температуры на поверхности. Из (20) видно, что чем меньше период, тем меньше глубина проникновения температуры. Для температурных колебаний с периодами τ_{01} и τ_{02} глубины x_1 и x_2 , на которых происходят одинаковое относительное изменение температуры связаны соотношением

$$x_2 = x_1\sqrt{\tau_{02}/\tau_{01}}. \quad (22)$$

При решении предельных КЗ в инженерной практике для нахождения локальных величин, например потоков, также удобно использовать бесполевой метод расчета тепловых и диффузионных потоков, который существенным образом использует производную произвольного индекса [26].

Из анализа результатов следует, что максимальная разница в расчетах, полученных в ходе аналитического и численного решений не выше 2% при расчетах в ПО Elcut. Отсюда следует, что КЗ без начальных условий поставлена корректно, а созданная численная ММ пригодна для решения подобных или более сложных КЗ кондуктивного переноса.

5 Заключение

1. В работе исследовано изменение температуры ОК зданий и сооружений в течение суток для г. Казань, которое можно описать простым гармоническим колебанием или наложением косинусоид.

2. При изменении температуры наружного воздуха в прямом или обратном направлениях, внутри ОК можно зафиксировать температурные волны, которые угасая, идут в глубину ОК.

3. Формализована математическая модель для переходного процесса теплопереноса через однослойную ОК, при задании температуры наружного воздуха в виде правильного гармонического колебания.

4. Проведено исследование квазистационарного переноса теплоты через однослойную ОК аналитическим и численным методами. Получены поля температур в толще ОК за каждый час рассматриваемых суток, с учетом заданного изменения температуры наружной поверхности стены по периодическому закону при аналитическом и численном решениях.

5. По полученным полям температур рассчитываются другие производные теплотехнические характеристики: средние температуры и скорости ее изменения, температурные напряжения (∇t) и их максимальные значения в ОК, тепловые потоки, теплопотери и ряд др.

6. Приведенные теплотехнические расчеты применимы для любых ОК и климатических зон.

Список литературы

1. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) – 3-е изд. Спб.: изд-во «АВОК Северо-Запад», 2006. 400 с.
2. Roberz F., Loonen R., Hoes P., Hensen J. Ultra-lightweight concrete: Energy and comfort performance evaluation in relation to buildings with low and high thermal mass // Energy and Buildings, 2017. Vol. 138. P. 432-442. DOI:10.1016/j.enbuild.2016.12.049

3. Leccese F., Salvadori G., Asdrubali F., Gori P. Passive thermal behaviour of buildings: Performance of external multi-layered walls and influence of internal walls // *Applied Energy*, 2018. Vol. 225. P. 1078-1089. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.05.090
4. Reilly A., Kinnane O. The impact of thermal mass on building energy consumption // *Applied Energy*, 2017. Vol. 198. P. 108-121. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.04.024
5. Ge J., Xue Y., Fan Y. Methods for evaluating and improving thermal performance of wall-to-floor thermal bridges // *Energy and Buildings*, 2021. Vol. 231, P. 1-15. DOI:10.1016/j.enbuild.2020.110565
6. Stavridou A., Prinos P. Unsteady CFD Simulation in a Naturally Ventilated Room with a Localized Heat Source // *Procedia Environmental Sciences*, 2017. Vol. 38. P. 322-330. DOI:10.1016/j.proenv.2017.03.087
7. Ravelo B., Rajaoarisoa L., Maurice O. Thermal modelling of multilayer walls for building retrofitting applications // *Journal of Building Engineering*, 2020. Vol. 29. P. 1-11. DOI: 10.1016/j.job.2019.101126
8. Evangelisti L., Guattari C., Gori P., Asdrubali F. Assessment of equivalent thermal properties of multilayer building walls coupling simulations and experimental measurements // *Building and Environment*, 2018. Vol. 127. P. 77-85. DOI:10.1016/j.buildenv.2017.10.038
9. Thomas L., Marino B., Muñoz N. Steady-state and time-dependent heat fluxes through building envelope walls: A quantitative analysis to determine their relative significance all year round // *Journal of Building Engineering*, 2020. Vol. 29. DOI:10.1016/j.job.2019.101122
10. Kong Q., He X., Cao Y., Sun Y., Chen K., Feng J. Numerical Analysis of the Dynamic Heat Transfer through an External Wall under Different Outside Temperatures // *Energy Procedia*, 2017. Vol. 105. P. 2818-2824.
11. Borodulin V., Nizovtsev M. Modeling heat and moisture transfer of building facades thermally insulated by the panels with ventilated channels // *Journal of Building Engineering*, 2021. Vol. 40. DOI:10.1016/j.job.2021.102391
12. Deconinck A., Roels S. The as-built thermal quality of building components: characterising non-stationary phenomena through inverse modelling // *Energy Procedia*, 2017. Vol. 132. P. 351-356. DOI:10.1016/j.egypro.2017.09.748
13. Jamal B., Boukendil M., Abdelbaki A., Zrikem Z. Numerical simulation of coupled heat transfer through double solid walls separated by an air layer // *International Journal of Thermal Sciences*, 2020. Vol. 156. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2020.106461
14. Vargas-González S., Núñez-Gómez K., López-Sánchez E., Tejero-Andrade J., Ruiz-López I., García-Alvarado M. Thermodynamic and mathematical analysis of modified Luikov's equations for simultaneous heat and mass transfer // *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021. Vol. 120.
15. Zhai H., Nie B., Chen B., Xu F. Unsteady flows on a roof imposed by a periodic heat flux: 2D simulation and scaling analysis // *International Journal of Thermal Sciences*, 2019. Vol. 145. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2019.106002
16. Pečenko R., Challamel N., Colinart T., Picandet V. (Semi-)analytical solution of Luikov equations for time-periodic boundary conditions // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018. Vol. 124. P. 533-542. DOI:10.1016/j.jheatmasstransfer.2018.02.106
17. Marino B., Muñoz N., Thomas L. Calculation of the external surface temperature of a multi-layer wall considering solar radiation effects // *Energy and Buildings*, 2018. Vol. 174. P. 452-463. DOI:10.1016/j.enbuild.2018.07.008
18. Schneider P. *Engineering Problems in Heat Conduction*. M.: IL, 1960. 478 p.
19. Aramanovich I.G., Levin V.I. *Uravneniya matematicheskoy fiziki*. M.: Nauka, 1964. 288p.
20. Eckert E. R. G., Drake R. M. *Analysis Of Heat And Mass*. M.: IL, 1961. 104 p.
21. Carslaw H. S., Jaeger J. C. *Conduction of Heat in Solids*. M.: IL, 1964. 488 p.
22. Samkob S.G., Kilbas A.A., Marichev O.I. *Integraly i proizvodnyye drobnogo poryadka i nekotoryye ikh prilozheniya*. Minsk: Nauka i tekhnika, 1987. 688 p.

References

1. Bogoslovsky V.N. Building Thermal Physics (Thermophysical Foundations of Heating, Ventilation and Air Conditioning) - 3rd ed. St.P: Publishing House "AVOK Severo-Zapad", 2006. 400p.
2. Roberz F., Loonen R., Hoes P., Hensen J. Ultra-lightweight concrete: Energy and comfort performance evaluation in relation to buildings with low and high thermal mass // *Energy and Buildings*, 2017. Vol. 138. P. 432-442. DOI:10.1016/j.enbuild.2016.12.049
3. Leccese F., Salvadori G., Asdrubali F., Gori P. Passive thermal behaviour of buildings: Performance of external multi-layered walls and influence of internal walls // *Applied Energy*, 2018. Vol. 225. P. 1078-1089. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.05.090
4. Reilly A., Kinnane O. The impact of thermal mass on building energy consumption // *Applied Energy*, 2017. Vol. 198. P. 108-121. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.04.024
5. Ge J., Xue Y., Fan Y. Methods for evaluating and improving thermal performance of wall-to-floor thermal bridges // *Energy and Buildings*, 2021. Vol. 231, P. 1-15. DOI:10.1016/j.enbuild.2020.110565
6. Stavridou A., Prinos P. Unsteady CFD Simulation in a Naturally Ventilated Room with a Localized Heat Source // *Procedia Environmental Sciences*, 2017. Vol. 38. P. 322-330. DOI:10.1016/j.proenv.2017.03.087
7. Ravelo B., Rajaoarisoa L., Maurice O. Thermal modelling of multilayer walls for building retrofitting applications // *Journal of Building Engineering*, 2020. Vol. 29. P. 1-11. DOI: 10.1016/j.job.2019.101126
8. Evangelisti L., Guattari C., Gori P., Asdrubali F. Assessment of equivalent thermal properties of multilayer building walls coupling simulations and experimental measurements // *Building and Environment*, 2018. Vol. 127. P. 77-85. DOI:10.1016/j.buildenv.2017.10.038
9. Thomas L., Marino B., Muñoz N. Steady-state and time-dependent heat fluxes through building envelope walls: A quantitative analysis to determine their relative significance all year round // *Journal of Building Engineering*, 2020. Vol. 29. DOI:10.1016/j.job.2019.101122
10. Kong Q., He X., Cao Y., Sun Y., Chen K., Feng J. Numerical Analysis of the Dynamic Heat Transfer through an External Wall under Different Outside Temperatures // *Energy Procedia*, 2017. Vol. 105. P. 2818-2824.
11. Borodulin V., Nizovtsev M. Modeling heat and moisture transfer of building facades thermally insulated by the panels with ventilated channels // *Journal of Building Engineering*, 2021. Vol. 40. DOI:10.1016/j.job.2021.102391
12. Deconinck A., Roels S. The as-built thermal quality of building components: characterising non-stationary phenomena through inverse modelling // *Energy Procedia*, 2017. Vol. 132. P. 351-356. DOI:10.1016/j.egypro.2017.09.748
13. Jamal B., Boukendil M., Abdelbaki A., Zrikem Z. Numerical simulation of coupled heat transfer through double solid walls separated by an air layer // *International Journal of Thermal Sciences*, 2020. Vol. 156. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2020.106461
14. Vargas-González S., Núñez-Gómez K., López-Sánchez E., Tejero-Andrade J., Ruiz-López I., García-Alvarado M. Thermodynamic and mathematical analysis of modified Luikov's equations for simultaneous heat and mass transfer // *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021. Vol. 120.
15. Zhai H., Nie B., Chen B., Xu F. Unsteady flows on a roof imposed by a periodic heat flux: 2D simulation and scaling analysis // *International Journal of Thermal Sciences*, 2019. Vol. 145. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2019.106002
16. Pečenko R., Challamel N., Colinart T., Picandet V. (Semi-)analytical solution of Luikov equations for time-periodic boundary conditions // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018. Vol. 124. P. 533-542. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.106
17. Marino B., Muñoz N., Thomas L. Calculation of the external surface temperature of a multi-layer wall considering solar radiation effects // *Energy and Buildings*, 2018. Vol. 174. P. 452-463. DOI:10.1016/j.enbuild.2018.07.008

18. Schneider P. Engineering Problems in Heat Conduction. M.: IL, 1960. 478 p.
19. Aramanovich I.G., Levin V.I. Uravneniya matematicheskoy fiziki. M.: Nauka, 1964. P.288.
20. Eckert E. R. G., Drake R. M. Analysis Of Heat And Mass. M.: IL, 1961. 104 p.
21. Carslaw H. S., Jaeger J. C. Conduction of Heat in Solids. M.: IL, 1964. 488 p.
22. Samkob S.G., Kilbasb A.A., Marichev O.I. Integraly i proizvodnyye drobnogo poryadka i nekotoryye ikh prilozheniya. Minsk: Nauka i tekhnika, 1987. 688 p.

Информация об авторах

Ренат Ахатович Садыков, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: sadykov_r_a@mail.ru

Аида Камилевна Мухаметзянова, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: aidamukham@gmail.com

Светлана Алексеевна Филимонова, инженер-проектировщик 1 категории ООО «Метрополис», г. Москва, Российская Федерация.

E-mail: svfi1996@gmail.com

Information about the authors

Renat A. Sadykov, doctor of Technical Sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: sadykov_r_a@mail.ru

Aida K. Mukhamezianova postgraduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: aidamukham@gmail.com

Svetlana A. Filimonova Engineer-designer of the 1st category, LLC "Metropolis", Moscow, Russian Federation

E-mail: svfi1996@gmail.com



DOI: 10.52409/20731523_2022_1_103
УДК 628.16

Исследование процессов глубокой очистки сточных вод с применением скорых напорных фильтров

А.В.Бусарев¹ И.Г.Шешегова¹, И.Д.Мамаков²

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань,
Российская Федерация

²ООО «Евро Акцент Саба», г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: очистка сточных вод от нефтепродуктов в последние годы становится все более актуальной задачей. На многих промышленных предприятиях образуются нефтесодержащие сточные воды, которые могут стать причиной загрязнения природных источников нефтепродуктами. В связи с этим сточные воды должны подвергаться очистке для снижения концентрации нефтепродуктов до нормативных показателей. Исследования процессов очистки сточных вод от нефтепродуктов имеют научную актуальность, поскольку позволяют решать проблемы защиты окружающей среды. Одним из методов глубокой очистки стоков от нефтепродуктов является фильтрование. Наиболее эффективно очистка воды от нефтепродуктов осуществляется в скорых напорных фильтрах.

Целью исследований очистки воды от нефтепродуктов методом фильтрования является изучение эффективности различных видов зернистой загрузки скорых напорных фильтров, а также определение технологических параметров фильтрования.

Задачами исследований являются:

- изучение процессов очистки нефтесодержащих стоков в скорых напорных фильтрах с различной зернистой загрузкой;
- определение оптимальной скорости фильтрования;
- определение влияния давления в скорых напорных фильтрах на эффективность очистки;
- исследование применения различных методов регенерации фильтрующей загрузки на эффективность очистки.

Основные результаты исследований состоят в том, что выбран вид наиболее эффективной зернистой загрузки, определены рекомендованные скорости фильтрования, а также давление в скорых напорных фильтрах для очистки нефтесодержащих сточных вод. Проведенные исследования показали достаточно высокую эффективность очистки нефтесодержащих сточных вод в скорых напорных фильтрах с зернистой загрузкой.

Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в определении наиболее эффективной фильтрующей зернистой загрузки, а также технологических параметров очистки сточных вод от нефтепродуктов в скорых напорных фильтрах. Лучший результат (эффект очистки 75-81%) показала двухслойная зернистая загрузка из антрацита и кварцевого песка. Скорость фильтрования в скорых фильтрах рекомендуется поддерживать в пределах 6-7 м/ч, интенсивность подачи промывной воды при регенерации не менее 14 л/(с·м²).

Ключевые слова: очистка сточных вод от нефтепродуктов, глубокая очистка сточных вод, очистка методом фильтрования, фильтрующая загрузка, скорость фильтрования, регенерация загрузки скорых напорный фильтр

Для цитирования: А.В. Бусарев И.Г. Шешегова, И.Д. Мамаков. Исследование процессов глубокой очистки сточных вод с применением скорых напорных фильтров//Известия КГАСУ 2022, №1(59). С 103-112. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_103

Study of deep wastewater treatment processes using high-pressure filters

A.V.Busarev¹, I.G.Sheshegova¹, I.D. Mamakov²

¹Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

²LLC «Euro Accent Saba», Kazan, Russian Federation

Abstract: problem statement. Many industrial plants generate oily wastewater. Filtration is one of the methods of deep purification of these effluents from oil products. The most effective purification from oil products is carried out in high-pressure filters. The purpose of the research on water purification from oil products by the filtration method is to study the effectiveness of various types of granulated loading of high-pressure filters, as well as to determine the technological parameters of filtration. Research objectives:

- study of the processes of purification of oily wastewater in high-pressure filters with different granulated loading;
- determination of the optimal filtration rate;
- determination of the influence of pressure in high-pressure filters on the cleaning efficiency;
- study of the application of various methods of regeneration of the filtering load for the cleaning efficiency;

Results. The main results of the research are that the type of the most effective granulated loading was chosen, the recommended filtration rates were determined, as well as the pressure in the high-pressure filters for oily wastewater treatment. The conducted studies have shown a rather high efficiency of cleaning oily wastewater high-pressure filters with a granulated load. Conclusions. The significance of the obtained results for the construction industry lies in determining the most effective filtering granulated load, as well as the technological parameters of wastewater treatment from oil products in high-pressure filters. The best result (cleaning effect 75-81%) was shown by a two-layer granulated loading of anthracite and quartz sand. The filtration rate in high-pressure filters is recommended to be maintained within 6-7 m/h, the intensity of the wash water supply during regeneration is at least 14 l/s·m².

Keywords: wastewater treatment from oil products, methods of wastewater treatment from oil products, sorption, sorbents for purification of water from oil products, adsorption filter.

For citation: A.V.Busarev, I.G.Sheshegova, I.D. Mamakov Study of deep wastewater treatment processes using high-pressure filters//News KSUAE 2022, №1 (59). С 103-112.

DOI: 10.52409/20731523_2022_1_103

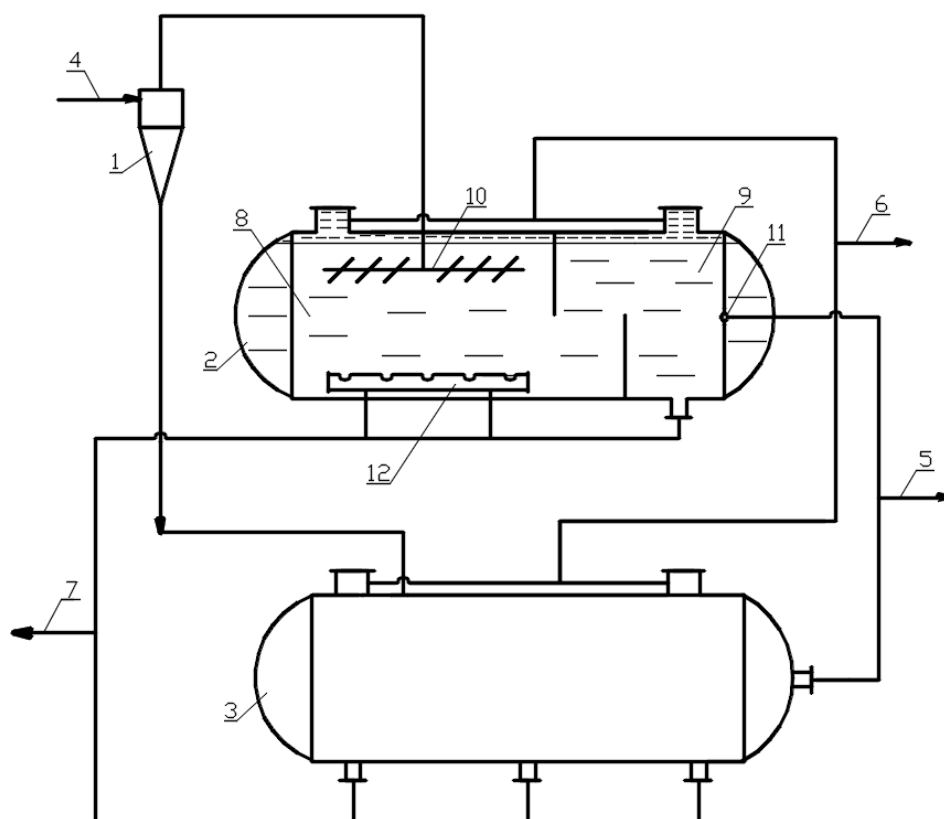
1. Введение

При нефтедобыче в Российской Федерации формируются нефтесодержащие сточные воды (НСВ). Из-за их загрязненности они закачиваются обратно в нефтеносные пласты для повышения коэффициента нефтеотдачи [1-4]. Перед закачкой НСВ в нефтеносные пласты производится их обработка: удаление из стоков взвеси и нефтепродуктов [1, 3].

Обработка НСВ осуществляется в отстойниках различных конструкций [5-8]. Также для подготовки нефтепромысловых стоков используются напорные гидроциклоны [9-12]. В Казанском государственном архитектурно-строительном университете (КГАСУ) разработан аппарат типа блок гидроциклон-отстойник (БГО) [13-16]. В этом устройстве концентрация нефтепродуктов в НСВ уменьшается с 3 г/л до 0,05-0,06 г/л, а взвеси – с 0,2 г/л до 0,05 г/л [13-16]. В устройства типа БГО входят напорные гидроциклоны и отстойники различных конструкций (одно и двухмостные, напорные и работающие в самотечном режиме. Горизонтальные и вертикальные).

На рис. 1 представлена двухмостная установка типа БГО с горизонтальными отстойниками, работающими в напорном режиме. НСВ подаются на очистку в батарею напорных гидроциклонов под избыточным давлением. Отстойники верхнего и нижнего

сливов, которые имеют одинаковую конструкцию, работают под давлением на 0,2 МПа ниже, чем давление на входе в гидроцилоны.



1 – гидроциклоны; 2 – отстойник верхнего слива; 3 – отстойник нижнего слива; 4 – подача воды на очистку; 5 – отвод очищенной воды; 6 – отвод уловленных нефтепродуктов; 7 – отвод выпавшего осадка; 8, 9 – отстойные камеры; 10 – водораспределительная система; 11 – система сбора очищенной воды; 12 – система сбора осадка

Рис. 1. Аппарат типа БГО (иллюстрация авторов)

В отстойнике выделены специальные отсеки, где всплывает нефть и осаждаются взвешенные вещества. В отсеках 8 размещаются водораспределители, представляющие собой коллекторы с двойными перфорированными ответвлениями. В отсеках 9 имеются водосборники, которые включают в себя перфорированные трубопроводы. Осадок собирается в отсеках 8 и 9 с помощью специальной системы, которая представляет собой перфорированный трубопровод. При обработке нефтесодержащих стоков в гидроциклонах наблюдается очистка воды от нефти, разрушение бронирующих оболочек вокруг капель внутренней фазы. А также повышение монодисперсности эмульсий типа «нефть в воде». Все это способствует последующей очистке НСВ методом отстаивания [13-15]. Для интенсификации процессов очистки НСВ в отстойных аппаратах БГО устанавливаются специальные насадки, в которых происходит коалесценция мелких частиц внутренней фазы. Это способствует повышению эффектов очистки НСВ в данных аппаратах [14, 16, 17].

Еще одной разновидностью аппаратов БГО является установки БГКО [14]. За счет энергии остаточного закручивания потока в цилиндрических камерах, установленных на сливах напорных гидроциклонов происходит возрастание эффективности работы отстойников, входящих в данную установку.

Для снижения концентрации нефти в НСВ до 0,01 г/л рекомендуется глубокая очистка этих стоков в фильтрах (с зернистой загрузкой, каркасно-засыпных, с плавающей загрузкой) [18-21].

Целью исследований очистки воды от нефтепродуктов методом фильтрования является изучение эффективности различных видов зернистой загрузки скорых напорных фильтров, а также определение технологических параметров фильтрования.

Задачи исследований:

- изучение процессов очистки нефтесодержащих стоков в скорых напорных фильтрах с различной зернистой загрузкой;
- определение оптимальной скорости фильтрования;
- определение влияния давления в скорых напорных фильтрах на эффективность очистки;
- исследование применения различных методов регенерации фильтрующей загрузки на эффективность очистки.

2. Материалы и методы

В Казанском государственном архитектурно-строительном университете на опытно-экспериментальной установке (рис. 2) проводилось изучение обработки НСВ методом фильтрования. В данную опытную установку входят резервуар 1 объемом 1,75 м³, модель скорого напорного фильтра 2 диаметром 150 мм, насосное оборудование, соединительные линии, вентили, клапаны и задвижки, контрольно-измерительные приборы (КИП).

Гранулометрический состав загрузки скорого фильтра определялся с помощью ситового отсева согласно рекомендациям, ГОСТ 12536-2014 «Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава».

По линии 3 резервуар 1 наполняется НСВ. В фильтр 2 НСВ поступает на очистку по линии 4. Во всасывающий трубопровод насоса Н-1 по линии 5 поступает нефть. Товарная нефть с электрообезвоживающей установки №3 (ЭЛОУ-3) НГДУ «Бавлынефть» ПАО «Татанефть» (плотность при +20°C 0,885 г/см³, вязкость 2,51×10⁻¹ см²/с) дозировалась с помощью насоса-дозатора. Очищенные стоки по линии 6 возвращаются в резервуар 1. НСВ из фильтра 2 по линии 7 при аварийной ситуации сбрасываются в производственную канализацию.

Контроль за расходом НСВ поступающих на фильтр 2 осуществляется расходомером Р-1, а давление на входе в этот аппарат контролируется манометром М-1. Из пробоотборника ПР-1 отбирается исходная НСВ. Манометр М-2 измеряет остаточное давление, а пробоотборник ПР-2 служит для определения загрязнений в очищенной воде.

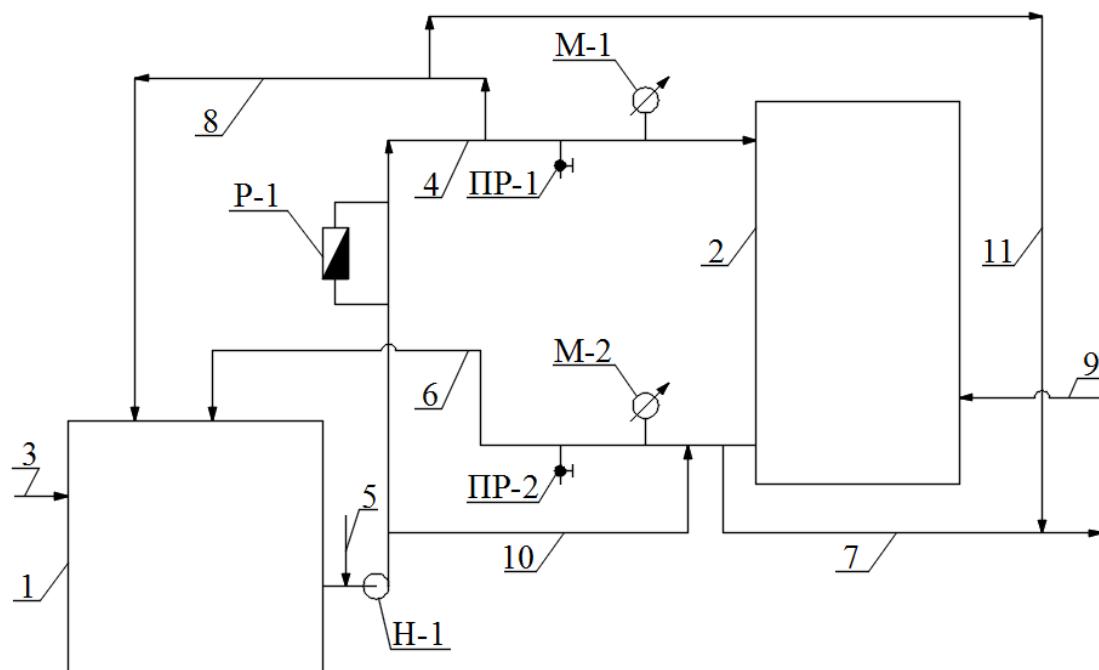


Рис. 2. Опытно-экспериментальная установка (иллюстрация авторов)

Линия 9 обеспечивает подачу в фильтр 2 сжатого воздуха от воздуходувки. По линии 10 в фильтр 2 из резервуара 1 поступает вода на промывку. Промывные стоки сбрасываются по линии 11 в производственную канализацию.

Измерение температуры исходной НСВ ведется спиртовым термометром с ценой деления 0,1 °С.

Содержание нефти в НСВ производилось фотоколориметром.

Эффективность очистки НСВ от нефтепродуктов, $\mathcal{E}_n$, %, определялась по формуле:

$$\mathcal{E}_n = \frac{C_n^{\text{исх}} - C_n^{\text{оч}}}{C_n^{\text{исх}}} \cdot 100, \quad (1)$$

где $C_n^{\text{исх}}$ – содержание нефти в НСВ, поступающих на очистку, мг/л;

$C_n^{\text{оч}}$ – содержание нефтепродуктов в очищенной воде, мг/л.

Исследования проводились:

- для различных типов зернистой загрузки скорых напорных фильтров (кварцевый песок, щебень, дробленый антрацит и кварцевый песок);
- для различных скоростей фильтрования от 6 до 8 м/ч;
- для различного давления на входе в напорные скорые фильтры от 2 до 5 кгс/см²;
- для регенерации загрузки скорых напорных фильтров применялась водовоздушная и водяная промывка;
- температура воды, поступающей на очистку в скорые напорные фильтры находилась в пределах от +19,7 до +20,2 °С

Концентрация нефтепродуктов в исходной воде находилась в диапазоне $4,3 \times 10^{-2}$ – $6,1 \times 10^{-2}$ г/л.

3. Результаты

Результаты исследований, представленных в таблице, показали, что при концентрации нефтепродуктов в исходной воде $4,3 \times 10^{-2}$ – $6,1 \times 10^{-2}$ г/л на выходе из скорого напорного фильтра их концентрация составила 9×10^{-3} – $3,4 \times 10^{-2}$ г/л, что подтверждает достаточно высокую эффективность очистки НСВ от нефтепродуктов скорых напорных фильтрах.

При исследовании возможности использования различных видов зернистой загрузки лучший результат показала двухслойная зернистая загрузка из антрацита и кварцевого песка. Эффект очистки от нефтепродуктов при ее использовании составил 75-81%. При регенерации данной загрузки использовалась водяная промывка. Худший результат достигнут при крупнозернистой гравийной загрузке. Эффект очистки составил 39-41%. Регенерация этой загрузки осуществлялась при помощи водовоздушной промывки.

Таблица

Результаты исследований

№	Тип загрузки	Потери давления на фильтре, кгс/см ²	V _ф , м/ч	C _н ^{исх} , мг/л	C _н ^{оч} , мг/л	Э _н , %	Вид промывки	T, °С		
1	2	3	5	6	7	8	9	10		
1	Кварцевый песок высота слоя 1,2 м, d _{фр} =1,2-2 мм	0,3	7	56	27	52	водовоздушная (1 режим)	20,0		
		0,4		52	27	50				
		0,4		54	28	48				
2	Гранитный щебень высота слоя 1,2 м, d _{фр} =3-10 мм	0,2	7	58	34	41	водовоздушная (2 режим)	19,8		
		0,3		49	30	39				
		0,3		53	32	40				
3	Дробленый керамзит высота слоя 0,4 м, d _{фр} =1,2-2 мм, Кварцевый песок высота слоя 0,6 м, d _{фр} =0,7-1,6 мм	0,4	7	60	17	72	водяная	19,7		
		0,3		51	14	73				
		0,5		57	17	70				
4	Дробленый антрацит высота слоя 0,4 м, d _{фр} =1,2-2 мм, Кварцевый песок высота слоя 0,6 м, d _{фр} =0,7-1,6 мм	0,3	7	48	9	81	водяная	20,1		
		0,4		55	11	79				
		0,4		51	10	80				
5		Дробленый антрацит высота слоя 0,4 м, d _{фр} =1,2-2 мм, Кварцевый песок высота слоя 0,6 м, d _{фр} =0,7-1,6 мм	0,3	6	56	9		84	20,2	
			0,4		61	11		82		
			0,4		59	10		83		
			0,6	8	43	10		77		19,9
			0,6		48	12		75		
			0,5		46	11		76		
6		Дробленый антрацит высота слоя 0,4 м, d _{фр} =1,2-2 мм, Кварцевый песок высота слоя 0,6 м, d _{фр} =0,7-1,6 мм	0,3	7	48	10		79	20,1	
			0,4		51	10		80		
			0,3		49	11		78		

4. Обсуждение

Анализ результатов исследований позволил выявить зависимость влияния скорости фильтрования и давления на эффективность очистки НСВ от нефти в скорых напорных фильтрах. Скорость фильтрования в скорых напорных фильтрах рекомендуется поддерживать в пределах 7 м/ч. Уменьшение этой скорости ведет к росту размеров фильтров, а увеличение – снижает эффективность очистки НСВ от нефти. Изменение давления на входе в скорый фильтр не влияет на эффективность работы этого аппарата.

Полученные результаты хорошо коррелируются с результатами исследований процессов очистки воды от нефтепродуктов [22-25]. В работах [24, 25] были представлены результаты исследований очистки воды от нефтепродуктов сорбцией и ультрафильтрацией. Эффективность очистки составила соответственно 87-95% [24] и 70-92% [25].

Полученная в результате проведенных исследований эффективность очистки от нефтепродуктов на скорых напорных фильтрах позволяет рекомендовать данный метод для очистки нефтесодержащих сточных вод наравне с сорбцией и ультрафильтрацией.

Дальнейшие исследования будут направлены на повышение эффективности работы напорных фильтров путем модернизации загрузки.

5. Заключение

Изучены процессы очистки нефтесодержащих стоков в скорых напорных фильтрах с различной зернистой загрузкой:

1. Выявлен вид зернистой загрузки скорых напорных фильтров, показывающий более высокий эффект очистки. Наиболее приемлемой является двухслойная загрузка из дробленного антрацита и кварцевого песка.

2. Определена оптимальная скорость фильтрования, которую рекомендуется поддерживать в пределах 7 м/ч. Увеличение скорости ведет к снижению эффективности очистки.

3. Установлено, что изменение давления на входе в фильтр не влияет на эффект очистки.

4. Регенерацию фильтрующей загрузки скорых напорных фильтров следует осуществлять фильтратом в направлении противоположном направлению фильтрации с интенсивностью не менее 14 л/с·м².

5. Исследования показали достаточно высокую эффективность очистки от нефтепродуктов в скорых напорных фильтрах. Применение скорых напорных фильтров с зернистой загрузкой является достаточно эффективным методом для очистки нефтесодержащих сточных вод.

Список литературы

1. Миронов Е. А. Закачка сточных вод нефтяных месторождений в продуктивные и поглощающие горизонты. М.: Недра, 1976. 169с.
2. Ogbeiwi P., Aladeitan Y., Udebhulu, D. An approach to waterflood optimization: case study of the reservoir X. *Petroleum Exploration and Production Technology*. 2018. 8. P. 271–289. DOI: 10.1007/s13202-017-0368-5.
3. Abdeli D., Seiden A. High performance water treatment technology for the reservoir pressure maintenance at oil fields // *Mechanical Engineering Research and Developments*. 2018. 41(4). P.66-81. DOI: 10.1007/s13202-019-0650-9.
4. Sarvestani A., Ayatollahi Sh., Moghaddam M. Smart water flooding performance in carbonate reservoirs: an experimental approach for tertiary oil recovery // *Petroleum Exploration and Production Technology*. 2019. 9. P. 2643–2657.
5. Gao H., Stenstrom M. K. Evaluation of three turbulence models in predicting the steady state hydrodynamics of a secondary sedimentation tank // *Water Research*. 2018. 143. P. 445-456. DOI:10.1016/j.watres.2018.06.067.
6. Torfs E., Martn M. C., Locatelli F., Balemans S., Byrger R., Diehl S., Nopens I. Concentration – driven models revisited: towards a unified framework to model settling tanks in water resource recovery facilities // *Water Science and Technology*. 2017. 75(3). P. 539-551. DOI: 10.2166/wst.2016.485.

7. Zhang Y., Chen A., Zhang P., Zhou Y., Zhang T. Refitted inclined plate for improving suspended solids removal in standard storm – water sumps // *Water Science and Technology*. 2018. 77(8). P. 2077-2083. DOI: 10.2166/wst.2018.121.
8. Farakhov M. I., Laptev A. G. and Basharov M. M. Modernization of devices for purifying liquids from dispersed phase in a petrochemical complex // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2015. 49 (6). P. 815-822. doi:10.1134/S0040579515060032
9. Yang X., Simmons M. J., Liu, P., Zhang Y., Jiang L. Effect of feed body geometry on separation performance of hydrocyclone // *Separation Science and Technology (Philadelphia)*. 2019. 54(2). P. 2959-2970. DOI: 10.1080/01496395.2019.1565772.
10. Yu J., Fu J. Separation performance of an 8 mm mini-hydrocyclone and its application to the treatment of rice starch wastewater // *Separation Science and Technology (Philadelphia)*. 2020. 55(2). P. 313-320. DOI: 10.1080/01496395.2018.1548486.
11. Han T., Liu H., Xiao H., Chen A., Huang Q. Experimental study of the effects of apex section internals and conical section length on the performance of solid-liquid hydrocyclone // *Chemical Engineering Research and Design*. 2019. 145. P. 12-18. DOI: 10.1016/j.cherd.2019.02.040.
12. Sriyono, Kusmastuti R., Butarbutar S. L., Salimy D. H. Analysis of hydrocyclone as river water pre-treatment for tertiary coolant of RDE // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. 198(2). P. 438-445. DOI: 10.1088/1742-6596/1198/2/022040.
13. Selyugin A., Busarev A., Abitov R. Experience in the use of Hydrocyclone Plants for Industrial Wastewater Treatment. In: International conference “Scientific research of the SCO countries”: Synergy and integration. Beijing: Minzu University of China. 2019. P. 166-169.
14. Урмитова Н.С. и др. Гидродинамическая очистка нефтепромысловых сточных на основе применения закрученных потоков. Казань: КГАСУ, 2014. 245с.
15. Гришин Б. М. и др. Очистка сточных вод нефтепромыслов с применением высокопроизводительных блочно-модульных установок. Пенза: ПГУАС, 2015. 135с.
16. Урмитова Н. С., Абитов Р. Н., Низамова А. Х. Коалесцирующие материалы, применяемые в насадках установок очистки нефтесодержащих сточных вод: сб. докладов XII международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН С. В. Яковлева. М.: Издательство МГСУ, 2017. С. 9-12.
17. Urmitova N., Abitov R., Nizamova A. Oil-containing wastewater treatment by means of using coarse-grained coalescing filtering materials IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 890 (2020) 012151 doi:10.1088/1757-899X/890/1/012151
18. Журба М. Г., Соколов Л. И., Говорова Ж. М. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: Т.2. Очистка и кондиционирование природных вод. М.: Издательство АСВ, 2010. 552с.
19. Пономарев В. Г. Процессы разделения суспензий сточных вод. Конструкции сооружений. М.: Издательство АСВ, 2015. 228 с.
20. Бусарев А. В., Селюгин А. С., Каюмов И. А., Бадрутдинов Р. А. Исследование процессов очистки сточных вод, мойки легковых автомобилей // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2017. №05(59). Часть 3. С. 10-13.
21. Бусарев А. В., Селюгин А. С., Каюмов Ф. Ф. К вопросу очистки поверхностных стоков в гидроциклонных установках // *Современные наукоемкие технологии*. 2016. №10. С. 229-232.
22. Lee J and Lee M Stormwater runoff treatment filtration system and backwashing system // *Water Science and Technology*. 2019. 79(4). P. 771-8. DOI:10.2166/wst.2019.097
23. Verma S, Daverey A and Sharma A Wastewater treatment by slow sand filters using uncoated and iron-coated fine sand: impact of hydraulic loading rate and media depth // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. 26(33). P. 34148-56. DOI:10.1007/s11356-018-3551-4.
24. Бусарев А.В., Шешегова И.Г., Ефремова Р.Ю. К вопросу удаления из природных вод нефтепродуктов методом сорбции // *Известия КГАСУ*. 2019. №4(50). С.313-319.
25. Бусарев А.В., Шешегова И.Г., Иванова В.О. Исследования по очистке воды от нефтепродуктов в мембранных разделителях // *Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: Материалы XI Национальной конференции с международным участием. – Саратов: ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ, 2021. С.16-19.*

References

1. Mironov E. A. Injection of waste water from oil fields into productive and absorbing horizons. Moscow: Nedra, 1976. P169.
2. Ogbeiwi P., Aladeitan Y., Udebhulu, D. An approach to waterflood optimization: case study of the reservoir X. *Petroleum Exploration and Production Technology*. 2018. 8. P. 271–289. DOI: 10.1007/s13202-017-0368-5.
3. Abdeli D., Seiden A. High performance water treatment technology for the reservoir pressure maintenance at oil fields // *Mechanical Engineering Research and Developments*. 2018. 41(4). P.66-81. DOI: 10.1007/s13202-019-0650-9.
4. Sarvestani A., Ayatollahi Sh., Moghaddam M. Smart water flooding performance in carbonate reservoirs: an experimental approach for tertiary oil recovery // *Petroleum Exploration and Production Technology*. 2019. 9. P. 2643–2657.
5. Gao H., Stenstrom M. K. Evaluation of three turbulence models in predicting the steady state hydrodynamics of a secondary sedimentation tank // *Water Research*. 2018. 143. P. 445–456. DOI:10.1016/j.watres.2018.06.067.
6. Torfs E., Marti M. C., Locatelli F., Balemans S., Bürger R., Diehl S., Nopens I. Concentration – driven models revisited: towards a unified framework to model settling tanks in water resource recovery facilities // *Water Science and Technology*. 2017. 75(3). P. 539-551. DOI: 10.2166/wst.2016.485.
7. Zhang Y., Chen A., Zhang P., Zhou Y., Zhang T. Refitted inclined plate for improving suspended solids removal in standard storm – water sumps // *Water Science and Technology*. 2018. 77(8). P. 2077-2083. DOI: 10.2166/wst.2018.121.
8. Farakhov M. I., Laptev A. G. and Basharov M. M. Modernization of devices for purifying liquids from dispersed phase in a petrochemical complex // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2015. 49 (6). P. 815-822. doi:10.1134/S0040579515060032
9. Yang X., Simmons M. J., Liu P., Zhang Y., Jiang L. Effect of feed body geometry on separation performance of hydrocyclone // *Separation Science and Technology (Philadelphia)*. 2019. 54(2). P. 2959-2970. DOI: 10.1080/01496395.2019.1565772.
10. Yu J., Fu J. Separation performance of an 8 mm mini-hydrocyclone and its application to the treatment of rice starch wastewater // *Separation Science and Technology (Philadelphia)*. 2020. 55(2). P. 313-320. DOI: 10.1080/01496395.2018.1548486.
11. Han T., Liu H., Xiao H., Chen A., Huang Q. Experimental study of the effects of apex section internals and conical section length on the performance of solid-liquid hydrocyclone // *Chemical Engineering Research and Design*. 2019. 145. P. 12-18. DOI: 10.1016/j.cherd.2019.02.040.
12. Sriyono, Kusmastuti R., Butarbutar S. L., Salimy D. H. Analysis of hydrocyclone as river water pre-treatment for tertiary coolant of RDE // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. 198(2). P. 438-445. DOI: 10.1088/1742-6596/1198/2/022040.
13. Selyugin A., Busarev A., Abitov R. Experience in the use of Hydrocyclone Plants for Industrial Wastewater Treatment. In: International conference “Scientific research of the SCO countries”: Synergy and integration. Beijing: Minzu University of China. 2019. P. 166-169.
14. Urmitova N. S. and others. Hydrodynamic treatment of oilfield wastewater based on the use of swirling flows. Kazan: KSUAE, 2014. P. 245.
15. Grishin B. M. and others. Oilfield wastewater treatment using high-performance modular units. Penza: PGUAS, 2015. P. 135.
16. Urmitova N. S., Abitov R. N., Nizamova A. Kh. Coalescing materials used in the nozzles of oily wastewater treatment plants: collection of articles. reports of the XII international scientific and technical conference dedicated to the memory of Academician S.V. Yakovleva. M.: Publishing house MGSU, 2017. P. 9-12.
17. Urmitova N., Abitov R., Nizamova A. Oil-containing wastewater treatment by means of using coarse-grained coalescing filtering materials IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 890 (2020) 012151 doi:10.1088/1757-899X/890/1/012151
18. Zhurba M. G., Sokolov L. I. and Govorova Zh. M. Water supply. Design of systems and structures: vol 2. Purification and conditioning of natural waters. M.: Izdatelstvo ASV, 2015. 552 p.
19. Ponomarev V. G. Processes of separation of wastewater suspensions. Structures of structures. M.: Izdatelstvo ASV, 2015. 228 p.

20. Busarev A. V., Selyugin A. S., Kayumov I. A., Badrutdinov R. A. Investigation of wastewater treatment processes, car washing // International scientific research journal. 2017. № 05 (59). Part 3. P. 10-13.
21. Busarev A. V., Selyugin A. S., Kayumov F. F. On the issue of surface effluent treatment in hydrocyclone installations // Modern science-intensive technologies. 2016. №10. P. 229-232.
22. Lee J and Lee M Stormwater runoff treatment filtration system and backwashing system // Water Science and Technology. 2019. 79(4). P. 771-8. DOI:10.2166/wst.2019.097
23. Verma S, Daverey A and Sharma A Wastewater treatment by slow sand filters using uncoated and iron-coated fine sand: impact of hydraulic loading rate and media depth // Environmental Science and Pollution Research. 2019. 26(33). P. 34148-56. DOI:10.1007/s11356-018-3551-4
24. Busarev A.V., Sheshhegova I.G., Efremova R.Y. On the issue of oil // Izvestiya KGASU. 2019. № 4 (50). P. 313-319.
25. Busarev A.V., Sheshhegova I.G., Ivanova V.O. Research on water purification from oil products in membrane separators // Modern problems and prospects for the development of construction, heat and gas supply and energy supply: Proceedings of the XI National Conference with international participation. - Saratov: Saratov State Agrarian University, 2021. P.16-19.

Информация об авторах

Бусарев Андрей Валерьевич кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: reder100@myrambler.ru

Шешегова Ирина Геннадьевна старший преподаватель Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: ig-7@mail.ru

Мамаков Илья Дмитриевич начальник проектного отдела ООО «Евро Акцент Саба» г. Казань, Российская Федерация

E-mail: mamakov.i@mail.ru

Information about the authors

A.V. Busarev candidate of the technical sciences, assistant professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: reder1@myrambler.ru

I.G. Sheshhegova senior lecturer, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: ig-7@mail.ru

I.D. Mamakov head of the design department LLC «Euro Accent Saba», Kazan, Russian Federation

E-mail: mamakov.i@mail.ru



DOI: 10.52409/20731523_2022_1_113
УДК 624.21.095.332

Совершенствование системы водоотвода с мостового полотна автодорожных мостов

О.К.Петропавловских¹, А.А.Ибрагимова², Р.Р.Садыков³, А.Р. Галиев⁴,
Р.Ф.Губайдуллин⁴

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г. Казань, Российская Федерация,

²ООО «Градпрактика», Москва, Российская Федерация

³ООО «Автодороги и сооружения», г.Казань, Российская Федерация

⁴ООО «СтройМост», г. Киров, Российская Федерация

Аннотация: на некоторых автодорожных мостах, возведенных в XX веке, существующая система отведения сточных вод с мостового полотна представлена лишь продольными и поперечными уклонами, а на тех мостах, где имеются водоотводные трубы, водосброс осуществляется под пролетное строение без предварительной очистки. Данная система водоотвода оказывает отрицательное воздействие на окружающую среду, так как загрязненные стоки с проезжей части сливаются в водоемы и близлежащие территории, а также приводит к снижению качества и долговечности дорожного покрытия и увеличению числа дорожно-транспортных происшествий.

Цель исследования заключается в определении наиболее приемлемых путей решения проблемы устаревших водоотводов на мостовых сооружениях, с разработкой мероприятий по совершенствованию системы поверхностного водоотвода с мостового полотна. В рамках исследования рассматривается пример совершенствования устаревшей системы водоотвода с мостового полотна автодорожного моста через реку Бира с целью удовлетворения современным экологическим требованиям и обеспечения безопасности всех участников движения.

Значимость полученных результатов для строительной отрасли и современной экологической обстановки заключается в возможности сокращения негативного влияния транспортно-дорожного комплекса на окружающую среду, а также увеличении сроков службы и повышении безопасности автодорожных мостов, что является одним из приоритетных направлений модернизации и развития сети автомобильных дорог Российской Федерации.

Основные результаты исследования: рассмотрен зарубежный и отечественный опыт решения вопроса рационального отвода поверхностного стока, поступающего на мостовое полотно автодорожных мостовых сооружений. Предложены пути решения для быстрого отвода воды с мостового полотна, позволяющие их накапливать и дренировать. На примере моста через реку Бира произведен гидравлический расчет и расчет сточных вод, а также представлена новая система водоотвода с мостового полотна.

Ключевые слова: система водоотвода, мостовые сооружения, проезжая часть, мостовое полотно, обследование, экология, дефекты, водоотводные лотки, гидравлический расчет, расчетный расход, локальные очистные сооружения.

Для цитирования: О.К.Петропавловских, А.А.Ибрагимова, Р.Р.Садыков, А.Р. Галиев, Р.Ф.Губайдуллин Совершенствование системы водоотвода с мостового полотна автодорожных мостов//Известия КГАСУ 2022, №1(59). С 113-125.

DOI: 10.52409/20731523_2022_1_113

Improving the drainage system from the bridge deck of road bridges

O.K. Petropavlovskikh¹, A.A. Ibragimova², R.R. Sadykov³, A.R. Galiev⁴,
R.F. Gubaidullin⁴

¹Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

²LLC «Gradpraktika», Moscow, Russian Federation

³LLC «Highways and facilities», Kazan, Russian Federation

⁴LLC «StroyMost» Kirov, Russian Federation

Abstract: Formulation of the problem. The vast majority of road bridges in the Russian Federation were built quite a long time ago, when society did not yet pay much attention to environmental issues, as a result of which, on existing bridge structures, the sewage disposal system from the bridge deck is represented only by longitudinal and transverse slopes, and on those bridges where there are drainage pipes, the spillway is carried out under the superstructure without preliminary cleaning. The purpose of the study is to analyze foreign and domestic experience in improving drainage systems from the bridge deck of road bridges. The study is also aimed at identification of the most acceptable ways to solve the problem of obsolete drainage systems on bridge structures, namely, to identify treatment facilities capable of accumulating and draining water entering the carriageway of bridge structures. The study considers an example of improving an outdated drainage system from the bridge deck of a road bridge across the Bira River, in order to meet modern environmental requirements.

Conclusions. The significance of the obtained results for the construction industry and the current environmental situation lies in the possibility of reducing the negative impact of the transport and road complex on the environment, which is one of the priority areas for the modernization and development of the road network of the Russian Federation.

Results. The main results of the study: foreign and domestic experience in solving the issue of rational drainage of surface runoff entering the bridge deck of road bridge structures is considered, using the example of a bridge across the Bira River, solutions are proposed for the rapid drainage of water from the bridge deck, allowing them to accumulate and drain. Based on this example, a hydraulic calculation and a wastewater calculation were made.

Keywords: drainage system, bridge structures, roadway, bridge deck, inspection, ecology, defects, drainage trays, hydraulic calculation, design flow, local treatment facilities.

For citation: O.K.Petropavlovskikh, A.A.Ibragimova, R.R.Sadykov, A.R.Galiev, R.F.Gubaidullin, Improving the drainage system from the bridge deck of road bridges//News KSUAE 2022, №1 (59). С 113-125. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_113

1. Введение

Строительство новых транспортных сооружений является неотъемлемой частью развития транспортной инфраструктуры, однако возведение нового мостового перехода через водное препятствие отрицательно воздействует на природно-территориальный комплекс. В период эксплуатации транспортное сооружение так же является источником отрицательного воздействия, в частности, недопустимым является попадание на прилегающие территории поверхностных стоков с моста, содержащих загрязняющие вещества [1]. Застой дождевых вод на поверхности проезжей части приводит к снижению качества и долговечности дорожного покрытия и увеличению количества дорожно-транспортных происшествий [2]. Эффективное решение задачи отвода поверхностных вод с мостового полотна транспортных сооружений при проектировании систем водоотвода имеет большое значение для обеспечения безопасного режима эксплуатации моста, сохранности дорожных одежд и основных конструкций, что бесспорно влияет на срок службы сооружения [3]. Вследствие чего необходимо устройство эффективной системы

водоотвода с мостового сооружения с последующим поступлением стоков на очистные сооружения.

Актуальность темы состоит в необходимости совершенствования систем водоотвода поверхностного стока с мостового полотна путем применения современных водоотводных и водоочистных систем, а также повышении транспортно-эксплуатационных показателей и безопасности дорожного движения. Научная новизна заключается в анализе текущего состояния системы водоотвода на существующем автодорожном мосту с последующим расчетом новой системы для удовлетворения современным требованиям. Практическая значимость заключается в необходимости совершенствования устаревшей системы водоотвода с целью недопущения попадания загрязненных сточных вод на прилегающие территории.

Одной из главных задач проектирования нового водоотвода с мостового сооружения является охрана окружающей среды путем обеспечения сбора и удаления воды с дорожной пылью и вредными химическими включениями, не допуская их попадания в водоемы и прилегающие земельные угодья, что не всегда выполняется на практике. Обеспечить безопасность дорожного движения, надёжность и нормативные сроки работы дорожных конструкций возможно только при наличии правильно запроектированной системы водоотвода. Современные водоотводные дорожные системы широко используют новые конструктивные элементы, однако из-за отсутствия нормативной и методической литературы по их установке производство работ нередко ведется с грубым нарушением технологического процесса, что приводит к деформациям и сокращению сроков службы водоотводных конструкций, отклонению отдельных транспортно-эксплуатационных показателей от нормативных значений [4]. Также, в России существуют старые мосты, система водоотвода которых требует переустройства, так как она уже не удовлетворяет современным требованиям, либо вовсе отсутствует.

В России основным документом, регламентирующим экологические принципы отвода воды с мостовых сооружений, а именно запрещающим неорганизованный сброс воды с сооружения является СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84. О необходимости применения локальных очистных сооружений для очистки сточных вод с точки зрения законодательных правил упоминается в работе авторов Пупырева Е.И. и Шеломкова [5]. Отдельные аспекты применения локальных очистных сооружений описаны в статье автора Тугарина Н. И. [6].

Ограниченность водных ресурсов, загрязнение стока продуктами автомобильных выбросов и реагентами, изменение климата – все эти факторы требуют выработки новых подходов к созданию и поддержанию качества городской среды в части сбора и очистки сточных вод с объектов транспортной инфраструктуры.

В современном мире насущным является вопрос экологически рационального проектирования. В мире получает развитие такое направление в проектировании, которое называется «Sustainable design» [7], то есть проектирование, максимально учитывающее состояние окружающей среды.

Использование биотехнологий является частью экологического развития городов. В Великобритании, США и Австралии, например, существуют государственные программы, связанные с применением систем регулирования поверхностного стока. Эти программы направлены на организацию поверхностного стока, где биотехнологии отвода воды являются ключевыми компонентами этих систем [8].

Проблему отсутствия систем водоотвода на старых мостах не обходят и зарубежные авторы. В настоящее время правильная система водоотвода не только продлевает срок службы моста, но и значительно снижает эксплуатационные расходы на его содержание, а также обеспечивает долгий срок службы всех частей конструкции моста [9]. Ответственное отношение к сбору и очистке сточной воды, в том числе сооружение водоотвода для мостов входит в программы устойчивого развития европейских городов [10].

Иностранные системы водоотвода так же включают водоотводные лотки, дренажные системы и повсеместное использование локальных очистных сооружений. Решая экологические проблемы, за рубежом очищенные ливневые воды применяют в качестве формирования новых средств озеленения городов. Использование данной технологии позволяет улучшить микроклимат в городах и экологическую обстановку [11].

Исследуемая проблема в Великобритании решается благодаря переходу к устойчивой системе городского водоотвода [12]. Такие страны как Канада, США, Австралия и др. развивают программу устойчивого развития территорий, важную позицию в которой занимает сбор и очистка городских сточных вод [13, 14].

Целью работы является выявление наиболее приемлемых путей решения проблемы устаревших водоотводов на мостовых сооружениях, с разработкой мероприятий по совершенствованию системы поверхностного водоотвода с мостового полотна на примере автодорожного моста через реку Бира.

Задачи исследования:

1. Анализ зарубежного и отечественного опыта по совершенствованию систем водоотвода с мостового полотна автодорожных мостов.
2. Определить техническое состояние исследуемого моста и предложить усовершенствованную систему водоотвода с очистными сооружениями, накапливающими и дренирующими поступающую на проезжую часть воду.
3. Рассмотреть современные методологии по расчету ливневого стока и гидравлическому расчету автодорожных мостов, а также выполнить на их основе расчеты для моста через реку Бира.

2. Материалы и методы

В первой части исследования проанализирован зарубежный и отечественный опыт по совершенствованию систем водоотвода с мостового полотна автодорожных мостов, изучены документы и регламенты, затрагивающие вопрос исследования.

Во второй части исследования, выявлены наиболее приемлемые пути решения данной проблемы на примере совершенствования устаревшей системы водоотвода с мостового полотна автодорожного моста через реку Бира с целью удовлетворения современным экологическим требованиям (Рис. 1). Заключение о техническом состоянии моста составлено по результатам натурного обследования.

В третьей части изучаются теоретические основы поверхностного водоотвода и расчеты для эффективного подбора нового водоотвода для моста через реку Бира. Данный мост введен в эксплуатацию в 1962 году. Схема моста $13 \times 32,40$ м, общая длина моста $L_m = 435,70$ м. Габарит проезжей части $\Gamma-7,00+2 \times 1,38$ м [15]. Водоотвод с проезжей части обеспечивается благодаря продольным и поперечным уклонам, со сбросом воды через водоотводные трубки под мост, что имеет свои разрушительные последствия.



Рис. 1. Пролётные строения моста. Конструкции опор моста (иллюстрация авторов)

Диагностика мостового сооружения проводилась путем анализа текущего состояния проблемы на действующем мосту, с целью получения актуальных данных о его состоянии, путем обследования и составления дефектной ведомости для рационального анализа состояния сооружения. Произведена оценка необходимости переустройства водоотводов на сооружениях, на которых он отсутствует и не соответствует современным экологическим нормам.

Конструктивные размеры водоотводных лотков должны обеспечивать требуемую пропускную способность, определяемую гидравлическим расчетом согласно ОДМ 218.2.057-2015. Для подбора подвесного водоотводного лотка гидравлический расчет выполняется с предпосылкой равномерного установившегося режима потока воды, т. е.

при постоянстве расчетного расхода дождевой воды Q_r и скорости течения v на каждом расчетном участке лотков [16].

Расчет осуществляют методом последовательных приближений, назначая геометрические параметры лотков (в том числе величину расчетной глубины водного потока, исходя из степени или глубины наполнения лотка h и соответственно площади w поперечного сечения потока воды в лотке) и, добиваясь разности в расчетных расходах Q_r и Q с пропускаемым расходом $Q = wv$ в низовом сечении лотков в пределах 5%.

Гидравлический расчет выполняют в следующей последовательности:

- назначаются геометрические параметры лотков, а также геометрический уклон дна водотока (i), определяются площадь живого сечения w и смоченный периметр χ , и вычисляется гидравлический радиус R (R_s).

- на последующем этапе определяют коэффициент Шези C с предварительным вычислением коэффициента (показателя степени) y или его назначением по приближенным зависимостям;

- по вычисленным значениям R , C и заданному уклону i определяют расчетную среднюю скорость по сечению лотка v и пропускаемый расход потока воды в лотке Q .

Если полученное значение Q отличается от расчетного значения Q_r более чем на 5%, то расчет повторяют, принимая другие значения h или r или меняя и то, и другое.

Для установившегося медленно изменяющегося движения потока основными формулами являются формула неразрывности потока, и формула Шези для определения средней скорости:

$$Q = wv = \text{const (вдоль потока)} \quad (1)$$

где Q – расход потока;

w – площадь живого сечения потока;

v – средняя скорость потока в данном живом сечении.

Формула Шези, определяющая расчетную среднюю скорость по сечению v , м/с, имеет вид:

$$v = C\sqrt{R \cdot i} \quad (2)$$

где C – коэффициент Шези, имеющий размерность м^{1/2}/сек, вычисляется по формуле Н.Н. Павловского:

$$C = \frac{1}{n} R^y \quad (3)$$

где R – гидравлический радиус, м, определяемый по формуле:

$$R = \frac{w}{\chi} \quad (4)$$

где w – площадь поперечного (живого) сечения потока воды в лотке в расчетном сечении (при расчетной глубине водного потока), м;

χ – смоченный периметр (периметр части сечения лотка, находящийся под уровнем жидкости) водного потока в расчетном сечении (при расчетной глубине водного потока и степени наполнения лотка), м.

Для рационального проектирования локальных очистных сооружений, необходимо произвести расчет поверхностного стока. При расчете поверхностного стока вычислены среднегодовые объемы поверхностных сточных вод, образующихся на территории водосбора, определены как сумма поверхностного стока за теплый (апрель-октябрь) и холодный (ноябрь-март) периоды года с общей площади водосбора объекта [17]. Кроме этого, определен расчетный объем поверхностного стока от дождя и талых вод, которые полностью направляются на очистные сооружения. Далее определены расчетные производительности очистных сооружений по талому и ливневому стоку.

3. Результаты

Техническое состояние моста через реку Бира по результатам текущего обследования оценено как неудовлетворительное в связи с наличием значительного количества дефектов третьей категории неисправности по долговечности сооружения и безопасности движения, несоответствием фактической грузоподъемности пролётных строений моста современным нормативных нагрузкам и общим моральным старением сооружения. Одной из основных проблем существующего моста можно назвать неудовлетворительную систему водоотвода. Следует выделить, ряд дефектов, касающихся системы водоотвода:

- недостаточные водоотводящие продольные и поперечные уклоны моста, которые способствуют застою воды на мостовом полотне;
- расстройство конструкций водоотводных трубок, затрудняющее водоотвод;
- отсутствие водоотводных лотков, в результате чего сброс воды и других загрязняющих веществ происходит в подмостовую зону, что негативно сказывается на окружающей среде;
- нарушение герметичности деформационных швов, что доказано следами течи на промежуточных опорах и других конструкциях моста;
- нарушение гидроизоляции мостового полотна, в результате чего замачиваются несущие конструкции, что приводит к сильнейшей коррозии металлических элементов, а также к разрушению железобетонных конструкций, вследствие интенсивного выщелачивания цементного камня с образованием сталактитов (до 15 см) и дальнейшей коррозией арматуры.

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод, о необходимости проведения реконструкции существующего моста в связи с несоответствием современным требованиям по обеспечению безопасности движения и пропускной способности сооружения, значительной потерей несущей способности сооружения, а также недопустимостью сброса неочищенных поверхностных стоков с проезжей части моста в пересекаемую реку и на прилегающие территории. В результате работы предлагается конструкция новой системы водоотвода для моста, удовлетворяющая современным нормам и требованиям.

Далее приводятся теоретические основы поверхностного водоотвода. Отвод воды по поверхности проезжей части рекомендуется производить по лотку, образованному парапетом, между проезжей частью и тротуаром. Для отвода воды с проезжей части, не имеющей парапетов, возможно применение лотков, расположенных на фасаде пролетного строения [18]. Возможно применение поверхностных водоотводных лотков, закрытых решетками, расположенных в уровне толщи покрытия проезжей части, в том числе прикромочных лотков. Верх водоотводных трубок следует устраивать ниже поверхности, с которой отводится вода, на 1–2 см. Водоотводные трубки должны иметь внутренний диаметр не менее 150 мм [19]. Водоотводные трубки на железобетонных пролетных строениях рекомендуется устанавливать при бетонировании пролетных строений или швов омоноличивания плит сборных балок пролетных строений [20].

Удаление воды из водоотводной трубки может осуществляться в продольный водоотводный лоток, подвешенный к конструкции пролетного строения, в вертикальный ливнесток, закрепленный на поверхности опоры, в отдельных случаях – в наземный водоотводный лоток на поверхности конуса или в подмостовом пространстве [21,22]. При этом следует исключить возможность попадания воды на другие конструкции мостового сооружения.

При проектировании мостового сооружения на подходах к нему следует предусматривать откосные водосбросные лотки или закрытую ливневую канализацию, перехватывающие воду с подходов к мосту и отводящие ее в дорожные водоотводы или в ливневую канализацию населенных пунктов [23].

Для предотвращения загрязнений окружающей среды стоки дождевых и иных вод с пролетных строений мостовых сооружений должны быть направлены в предусмотренные в комплексе объектов дорожно-мостового строительства локальные очистные сооружения. При наличии возможности приема стоки направляются в ливневую канализацию населенных пунктов или дорожную ливневую канализацию, для дальнейшей очистки в очистных сооружениях [24, 25].

По результатам гидравлического расчета для новой конструкции поверхностного водоотвода был принят водоотводной прямой подвесной лоток 200×300 ТТК.101.20.30.01.001-300 по ГОСТ 21509 (Рис. 2).

Таблица 1

Размеры подвешного лотка в миллиметрах

Ширина сечения, Z	Глубина сечения, h	Радиус скругления, R	Угол развала стенок лотка, α°	Длина лотка, L	Ширина стыковочного фланца, b	Толщина стенки лотка, t
200	300	60	11	3100	100	3.0

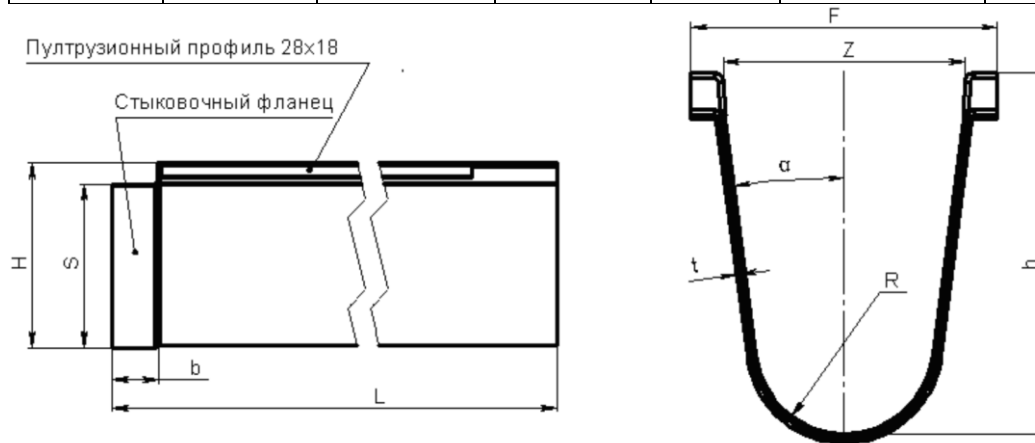


Рис. 2. Геометрические параметры подобранного водоотводного лотка: H – высота лотка; h – глубина лотка; b – ширина стыковочного фланца; S – высота стыковочного фланца; t – толщина стенки лотка; R – радиус скругления лотка; F – ширина по верхней части лотка; Z – ширина внутренней части лотка; α – угол развала стенок лотка (источник: ГОСТ 21509 Лотки железобетонные оросительных систем. Технические условия)

Данный водоотводной лоток при заданных параметрах уклона имеет пропускную способность $Q = 41.1$ л/с, что согласно СП 32.13330.2012 больше расчетного расхода дождевой воды $Q_{\text{cal}} = 30.1$ л/с на 30%, однако при выполнении расчета по СП 32.13330.2018 расчетный расход $Q_r = 42.7$ л/с, что на 3.8% больше пропускной способности лотка, но находится в пределах 5%. Расчет производился при заполнении лотка на 70% высоты. Общая длина водоотводных лотков составляет 858 м. Годовой объем поверхностных сточных вод, образующихся на территории водосбора, складывается из сумм среднегодового объема дождевых, талых, и поливочных вод. Средний годовой объем поверхностных сточных вод с автодорожного моста через реку Бира составляет 4530 м³/год.

Расчетный объем поверхностного стока от дождя, который полностью направляется на очистные сооружения составляет 60 м³, при общей площади стока равной 60 га. Суточный объем сточных вод от талого стока составляет 17 м³, при учете частичной уборки территории от снега и неравномерности снеготаяния. Тогда расчетная производительность по дождевому стоку составляет 0.27 л/с, по талому стоку 0.22 л/с.

На основании проведенного расчета сточных вод, поступающих на очистку, в качестве очистного сооружения принято локальное очистное сооружение модульного типа Векса-2 (ТУ 4859-001-98116734) с производительностью 2 л/с (Рис. 3). Объем аккумулирующего резервуара должен быть не менее объема дождевого стока от расчетного дождя, но при этом, если резервуар используется преимущественно для регулирования расхода поступающих на очистку сточных вод, то его объем должен быть на 5-10% больше требуемого значения, поэтому принят резервуар Armoplast HE-70-3200 (ТУ 4859-001-98116734).

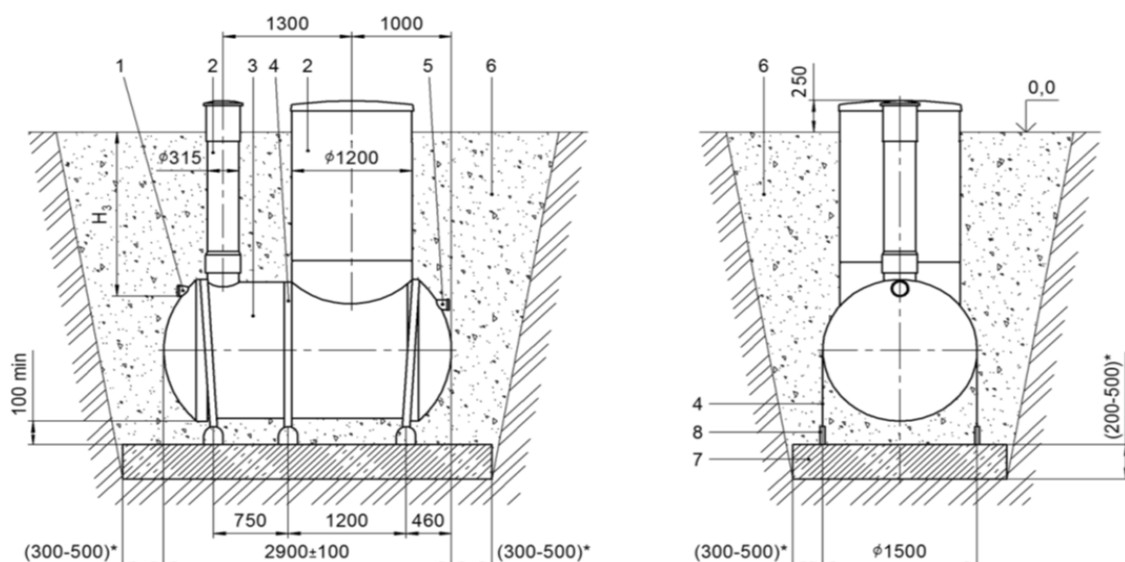


Рис. 3. Очистное сооружение модульного типа Векса-2: 1 – патрубок входной; 2 – колодец технический с пластиковым люком; 3 – корпус установки «Векса-2»; 4 – стропа с талрепами (входит в монтажный комплект); 5 – патрубок выходной; 6 – песок уплотнённый; 7 – фундаментная железобетонная плита; 8 – закладная деталь (иллюстрация авторов)

4. Обсуждение

По результатам проведенного анализа, устойчивое развитие территории стоит на первом месте в программах развития за рубежом, а значит вопрос сбора, очистки воды, а также применение биоинженерных сооружений нашли самое широкое применение. В современном мире при развитии города и его улично-дорожной сети необходимы мероприятия по обеспечению экологической безопасности, сбережению природных ресурсов, сохранения и восстановления естественной среды.

В рамках работы был определен предмет исследования: существующий мост через реку Бира. За период времени, прошедший с момента ввода моста в эксплуатацию, трижды изменялись нормы проектирования мостовых сооружений, что привело к полному несоответствию основных параметров сооружения значительными выросшими нормативными требованиями в части пропускной способности, грузоподъемности мостов, а также требованиям экологии.

Оценка и анализ дефектов мостового сооружения выявили неисправность системы отвода воды с мостового полотна и отсутствие аквапланирования. Кроме того, в результате неорганизованного водоотвода с мостового полотна происходит сброс неочищенных поверхностных стоков с проезжей части моста в пересекаемую реку и на прилегающие территории, что является недопустимым.

Учитывая массовость дефектов и степень разрушения решение о переустройстве системы водоотвода представляется очевидным. В результате работы предлагается конструкция новой системы поверхностного водоотвода, удовлетворяющая современным нормам и требованиям. Данная система предусматривает отвод воды с мостового полотна в водоотводные лотки посредством уклонов покрытия, затем вода поступает в локальные очистные сооружения.

Современные конструкции лотков, очистных сооружений, резервуаров насчитывают множество вариантов. Согласно анализу отечественного и зарубежного опыта распространено применение композитных, металлических и пластиковых водоотводных лотков. Пластиковые лотки имеют сравнительно низкую стоимость, небольшой вес, устойчивость к температурам. Среди недостатков пластиковых водоотводных лотков – низкая прочность и невысокая устойчивость к механическим нагрузкам. Главным недостатком металлических лотков является коррозия. В данном случае, применены композитные водоотводные лотки, являющиеся наиболее перспективными в эксплуатации

и развитии. Композитные лотки не требуют окраски, не подвержены воздействию ультрафиолетовых лучей и коррозии, долговечны [26].

Среди известных типов очистных сооружений упоминаются гидробатические площадки и емкостные очистные сооружения. В условиях нашего климата, срок работы гидробатических площадок составляет всего 4 месяца, что говорит о нецелесообразности применения данной системы. Отличительной негативной особенностью емкостных очистных сооружений является их размер, что увеличивает объем земляных работ, а расположение ниже глубины промерзания приводит к трудностям в их эксплуатации. Самым современным типом очистных сооружений принято считать локальные очистные сооружения, работающие на основе сорбционно-фильтрационной технологии, являющейся наиболее эффективной и простой [27]. Примененные конструкции локального очистного сооружения и аккумулирующего резервуара выполнены из стеклопластика, отличающегося долгим сроком службы, прочностью и устойчивостью к коррозии.

В перспективе, запланировано рассмотрение вопроса расчета и конструирования дренажного водоотвода, а также изучение водоупорных свойств различных типов асфальтобетона.

5. Заключение

1. Выполнен анализ зарубежного и отечественного опыта по совершенствованию систем водоотвода с мостового полотна автодорожных мостов. Отмечается перспективное развитие отечественного проектирования, инновационная направленность которого повернута в сторону очистки и повторного использования сточных вод.

2. Определено текущее состояние автодорожного моста через реку Бира, предложена усовершенствованная система водоотвода, выявлены очистные сооружения, способные накапливать и дренировать воду, поступающую на проезжую часть исследуемого сооружения.

3. В статье представлена методика расчета расхода сточных вод с проезжей части, выполнен гидравлический расчет, по результатам которого подобран подвесной водоотводный лоток. Кроме того, данное исследование включает в себя методику определения среднегодовых объемов поверхностных сточных вод, определение расчетных объемов поверхностных сточных вод при отведении их на очистку от дождевого и талого стока для последующего подбора локального очистного сооружения.

Список литературы

1. Лапина, О. А. Экологические требования к проектам строительства / О. А. Лапина // Интернет-журнал Науковедение. – 2013. – № 5 (18). – С. 133.
2. Николаева Р. В., Газизова З. С. Управление безопасностью дорожного движения в Республике Татарстан // Вестник НЦБЖД. – 2018. – № 2 (36). – С. 87–92.
3. Toryila, T. M. The effects of poor drainage system on road pavement: A review / T. M. Toryila, I. V. Terparse, I. E. Terlumun. // International Journal for innovative research in multidisciplinary field 2. – 2016. – № 8. – P.216-223.
4. Осипова, Т. В. Анализ системы дорожного водоотвода / Т. В. Осипова // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2020. – № 1(40). – С. 28-30.
5. Пупырев Е.И., Шеломков А.С. Экономическое обоснование экологически безопасных технологий очистки сточных вод // ВСТ. – 2014. – № 1. – С. 77.
6. Тугарин, Н. И. Локальные очистные сооружения / Н. И. Тугарин // Планирование, проведение и интерпретация результатов научно-технических исследований : сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Волгоград, 08 мая 2019 года. – Волгоград: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований". – 2019. – С. 44-50.
7. Современные пешеходные и велосипедные мосты (основные концепции проектирования и примеры): моногр. / И.И. Овчинников, А.Б. Караханян, И.Г. Овчинников, Ю.П. Скачков. – Пенза: ПГУАС, – 2018. – С.140.
8. Логинова О. А., Азаревич Э. Н. Улучшение организации водоотвода на улично-дорожной сети Казани // Известия КГАСУ. – 2020. – № 4 (54). – С. 112–120.

9. Vlček, P., Končický, J. (2012). Water Impact Reduction on the Deck of the Bridge Structure by Using Complete Drainage Installation. *Procedia Engineering*, 40. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.130
10. Davis M., Naumann S. Making the Case for Sustainable Urban Drainage Systems as a Nature-Based Solution to Urban Flooding. In: Kabisch N., Korn H., Stadler J., Bonn A. (eds) *Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas. Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions*. Springer, Cham. – 2017. – С. 123-137. DOI:10.1007/978-3-319-56091-5_8
11. Michalek, A. Assessment of climatic and anthropogenic controls on bridge deck drainage and sediment removal / A. Michalek, A. Husic, J. Roundy, A. T. Hansen // *Water (Switzerland)*. – 2021. – Vol. 13. – № 24. DOI: 10.3390/w13243556
12. Sustainable Drainage Systems (SUDS) 2018. Design and Technical Guidance. 2018. URL.: <http://modern.gov.sthelens.gov.uk/mgConvert2PDF.aspx?ID=89588> (дата обращения: 10.02.2022).
13. Activities of the European Union on sustainable urban development. A brief overview. European Urban Knowledge Network. URL: <https://www.eukn.eu/fileadmin/Lib/files/EUKN/2013/Activities%20of%20the%20European%20Union%20on%20sustainable%20urban%20development.pdf> (дата обращения: 10.02.2022).
14. Stigsdotter U. A. Landscape architecture and health. Evidence-based health-promoting design and planning. Swedish University of Agricultural Sciences. URL: <https://pub.epsilon.slu.se/864/1/UlrikaStigsdotter.pdf> (дата обращения: 10.02.2022).
15. Петропавловских, О. К. Анализ системы водоотвода на автодорожном мосту через р. Бира в г. Биробиджан / О. К. Петропавловских, Р. Р. Садыков // *Техника и технология транспорта*. – 2021. – № 2(21).
16. Пузанкова, К. А. Обзор существующих методик гидравлических расчетов водоотводных подвесных лотков мостовых сооружений / К. А. Пузанкова, О. А. Логинова // *Техника и технология транспорта*. – 2021. – № 2(21).
17. Бабкин, И. А. Совершенствование системы водоотведения с проезжей части автомобильных дорог : специальность 05.23.11 "Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бабкин Игорь Александрович. – Омск, – 2014. – С.122.
18. Овчинников, И. Г. Обеспечение долговечности автодорожных мостов - пути решения проблемы / И. Г. Овчинников, О. Н. Распоров, И. И. Овчинников // *Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог. Сборник научных трудов ОАО ГИПРОДОРНИИ*. – 2014. – № 5(64). – С. 36-43.
19. Садыков, Р. Р. Защита окружающей среды при строительстве транспортных сооружений / Р. Р. Садыков, О. К. Петропавловских // *Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований : Материалы XXIII международной научно-практической конференции, North Charleston, USA, 22–23 июня 2020 года*. – North Charleston, USA: LuluPress, Inc., – 2020. – С. 77-79.
20. Бычковский, Н. Н. Строительство железобетонных мостов : монография в 2 частях / Н. Н. Бычковский, С. И. Пименов ; Н. Н. Бычковский, С. И. Пименов ; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Саратовский гос. технический ун-т. – Саратов : Саратовский гос. технический ун-т, – 2006. – С.30.
21. Awwad, M. Studying the effects of roads geometry and design parameters on the pavement drainage system / M. Awwad // *Civ. Eng. J.* – 2021. – №7, – P. 49–58. DOI: 10.28991/cej-2021-03091636
22. Schweikert, A. The infrastructure planning support system: Analyzing the impact of climate change on road infrastructure and development / A. Schweikert, P. Chinowsky, K. Kwiatkowski, X. Espinet // *Transp. Policy* – 2014. – Vol. 35(C). – P. 146–153. DOI: 10.1016/j.tranpol.2014.05.019
23. Семенова, Т. В. Совершенствование метода проектирования системы поверхностного водоотвода автомобильных и городских дорог по условиям обеспечения безопасности движения: специальность 05.23.11 "Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей": диссертация на

соискание ученой степени кандидата технических наук / Семенова Татьяна Викторовна. Омск. –2011. – С. 144.

24. Гидравлические исследования сбросных лотков поверхностных водоотводов с автомобильных дорог и мостов / Д. В. Штеренлихт, Н. В. Ханов, И. Ф. Пикалова, Е. В. Исаихина // Природообустройство. – 2012. – № 3. – С. 88-91.

25. Экологические требования при проектировании и строительстве объектов / В. Н. Азаров, С. Е. Манжилевская, Н. В. Коваль, А. Д. Симерникова // Вестник евразийской науки. – 2018. – Т. 10. – № 6. – С. 57.

26. Mosallam AS., Polymer Composites in Construction: An Overview / Mosallam AS., Bayraktar A., Elmikawi M., Pul S., Adanur S. // SOJ Mater Sci Eng 2(1), – 2014. – №25. DOI: <http://dx.doi.org/10.15226/sojmse.2014.00107>

27. Винокуров К. И., Крестьянинова А. Ю. Локальные очистные сооружения поверхностного стока на автомобильных дорогах и мостовых переходах // Экология и строительство. – 2019. – №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/lokalnye-ochistnye-sooruzheniya-poverhnostnogo-stoka-na-avtomobilnyh-dorogah-i-mostovyh-perehodah> (дата обращения: 15.02.2022).

References

1. Lapina O. A. Ekologicheskie trebovaniya k proektam stroitel'stva [Environmental requirements for construction projects]. Online Journal of Science Studies. –2013; –№ 5(18). –P. 133 (In Russian).

2. Nikolaeva R. V., Gazizova Z. S. Upravlenie bezopasnost'yu dorozhnogo dvizheniya v Respublike Tatarstan [Management of road safety in the Republic of Tatarstan] // Vestnik NCBZhD. – 2018. – № 2 (36). – P. 87–92 (In Russian).

3. Toryila, T. M. The effects of poor drainage system on road pavement: A review / T. M. Toryila, I. V. Terpase, I. E. Terlumun. // International Journal for innovative research in multidisciplinary field 2. – 2016. – № 8. – P. 216-223.

4. Osipova, T. V. Analiz sistemy dorozhnogo vodootvoda [Analysis of the road drainage system]. Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve. – 2020. – № 1(40). – P. 28-30.

5. Pupyrev E.I., Shelomkov A.S. Ekonomicheskoe obosnovanie ekologicheski bezopasnykh tekhnologiy ochistki stochnykh vod [Economic justification for environmentally friendly wastewater treatment technologies] // VST. – 2014. – № 1. – P. 77 (In Russian).

6. Tugarin, N. I. Lokal'nye ochistnye sooruzheniya [Local treatment facilities] / Planirovanie, provedenie i interpretatsiya rezul'tatov nauchno-tekhnicheskikh issledovaniy : sbornik statej po itogam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Volgograd, 08 maya 2019 goda. – Volgograd: Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu \Agentstvo mezhdunarodnykh issledovaniy\, – 2019. – P. 44-50 (In Russian).

7. Sovremennye peshekhodnye i velosipednye mosty (osnovnye koncepcii proektirovaniya i primery) [Modern pedestrian and bicycle bridges (basic design concepts and examples)]: monograph / I.I. Ovchinnikov, A.B. Karahanyan, I.G. Ovchinnikov, Y.P. Skachkov. – Penza: PGUAS, –2018. – P. 140 (In Russian).

8. Loginova O. A., Azarevich E. N. Uluchshenie organizatsii vodootvoda na ulichno-dorozhnoy seti Kazani [Improving the organization of drainage on the street and road network of Kazan] // Izvestiya KGASU. –2020. –№ 4 (54). –P. 112–120.

9. Vlček, P., Končický, J. Water Impact Reduction on the Deck of the Bridge Structure by Using Complete Drainage Installation. Procedia Engineering, –2012. –№40. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.130

10. Davis M., Naumann S. Making the Case for Sustainable Urban Drainage Systems as a Nature-Based Solution to Urban Flooding. In: Kabisch N., Korn H., Stadler J., Bonn A. (eds) Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas. Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions. Springer, Cham. – 2017. – P. 123-137. DOI:10.1007/978-3-319-56091-5_8

11. Michalek, A. Assessment of climatic and anthropogenic controls on bridge deck drainage and sediment removal / A. Michalek, A. Husic, J. Roundy, A. T. Hansen // Water (Switzerland). – 2021. – Vol. 13. – № 24. DOI: 10.3390/w13243556.

12. Sustainable Drainage Systems (SUDS) 2018. Design and Technical Guidance. 2018. URL.: <http://moderngov.sthelen.gov.uk/mgConvert2PDF.aspx?ID=89588> (reference date: 10.02.2022).
13. Activities of the European Union on sustainable urban development. A brief overview. European Urban Knowledge Network. URL: <https://www.eukn.eu/fileadmin/Lib/files/EUKN/2013/Activities%20of%20the%20European%20Union%20on%20sustainable%20urban%20development.pdf> (reference date: 10.02.2022).
14. Stigsdotter U. A. Landscape architecture and health. Evidence-based health-promoting design and planning. Swedish University of Agricultural Sciences. URL: <https://pub.epsilon.slu.se/864/1/UlrikaStigsdotter.pdf> (reference date: 10.02.2022).
15. Petropavlovskikh O. K., Sadykov R. R. Analiz sistemy vodootvoda na avtodorozhnom mostu cherez r. Bira v g. Birobidzhan [Analysis of the drainage system on the road bridge over the Bira river in Birobidzhan]. Transport equipment and technology. –2021. –№ 2(21) (In Russian).
16. Puzankova K. A., Loginova O. A. Obzor sushchestvuyushchikh metodik gidravlicheskh raschetov vodootvodnykh podvesnykh lotkov mostovykh sooruzheniy [Review of existing methods of hydraulic calculations of drainage suspended trays of bridge structures]. Transport equipment and technology. –2021; –№ 2(21) (In Russian).
17. Babkin, I. A. Sovershenstvovanie sistemy vodootvedeniya s proezzhey chasti avtomobil'nykh dorog: spetsial'nost' 05.23.11 "Proektirovanie i stroitel'stvo dorog, metropolitenov, aerodromov, mostov i transportnykh tonneley»: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Improvement of the drainage system from the roadway of highways] Omsk, –2014. – P.122 (In Russian).
18. Ovchinnikov I. G., Rasporov O. N., Ovchinnikov I. I. Obespechenie dolgovechnosti avtodorozhnykh mostov - puti resheniya problemy [Ensuring the durability of road bridges - ways to solve the problem]. Current issues of road design. Collection of scientific papers of JSC GIPRODORNII. –2014. –№ 5(64). – P.36-43 (In Russian).
19. Sadykov R. R., Petropavlovskikh O. K. Zashchita okruzhayushchey sredy pri stroitel'stve transportnykh sooruzheniy [Environmental protection in the construction of transport facilities]. Current directions of fundamental and applied research: Materials of the XXIII International Scientific and Practical Conference, North Charleston, USA. –2020. –P. 77-79 (In Russian).
20. Bychkovskiy N. N., Pimenov S. I. Stroitel'stvo zhelezobetonnykh mostov : monografiya v 2 chastyakh [Construction of reinforced concrete bridges : a monograph in 2 parts]. Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Federal Agency for Education, Saratov State Technical University. –2006. –P.30 (In Russian).
21. Awwad, M. Studying the effects of roads geometry and design parameters on the pavement drainage system / M. Awwad // Civ. Eng. J. – 2021. – №7, – P. 49–58. DOI: 10.28991/cej-2021-03091636.
22. Schweikert, A. The infrastructure planning support system: Analyzing the impact of climate change on road infrastructure and development / A. Schweikert, P. Chinowsky, K. Kwiatkowski, X. Espinet // Transp. Policy – 2014. – Vol. 35(C). – P. 146–153. DOI: 10.1016/j.tranpol.2014.05.019.
23. Semenova, T. V. Sovershenstvovanie metoda proektirovaniya sistemy poverkhnostnogo vodootvoda avtomobil'nykh i gorodskikh dorog po usloviyam obespecheniya bezopasnosti dvizheniya : spetsial'nost' 05.23.11 "Proektirovanie i stroitel'stvo dorog, metropolitenov, aerodromov, mostov i transportnykh tonneley" : dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Improvement of the design method of the surface drainage system of highways and urban roads in accordance with the conditions for ensuring traffic safety] Omsk. –2011. –P. 144 (In Russian).
24. Shterenlikht D. V., Khanov N. V., Pikalova I. F., Isaikhina E. V. Gidravlicheskie issledovaniya sbrosnykh lotkov poverkhnostnykh vodootvodov s avtomobil'nykh dorog i mostov [Hydraulic studies of discharge trays of surface water drains from highways and bridges]. Environmental management. – 2012. – № 3. – P. 88-91 (In Russian).
25. Azarov V. N., Manzhilevskaya S. E., Koval' N. V., Simernikova A. D. Ekologicheskie trebovaniya pri proektirovanii i stroitel'stve ob"ektov [Environmental requirements for the design

and construction of facilities]. Bulletin of Eurasian Science. – 2018. – №6 (10). – P. 57 (In Russian).

26. Mosallam AS., Polymer Composites in Construction: An Overview / Mosallam AS., Bayraktar A., Elmikawi M., Pul S., Adanur S. // SOJ Mater Sci Eng 2(1), – 2014. – №25. DOI: <http://dx.doi.org/10.15226/sojmse.2014.00107>

27. Vinokurov K. I., Krestyaninova A. Yu. Lokal'nye ochistnye sooruzheniya poverkhnostnogo stoka na avtomobil'nykh dorogakh i mostovykh perekhodakh [Local treatment facilities for surface runoff on roads and bridge crossings] // Ecology and construction. – 2019. – №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/lokalnye-ochistnye-sooruzheniya-poverkhnostnogo-stoka-na-avtomobilnyh-dorogah-i-mostovyh-perehodah> (reference date: 15.02.2022) (In Russian).

Информация об авторах.

Ольга Константиновна Петропавловских Старший преподаватель,
Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань,
Российская Федерация.
Email: olga_konst@mail.ru

Ания Айратовна Ибрагимова Инженер 3 категории, ООО «Градпрактика»
г. Москва, Российская Федерация
E-mail: anyia13@mail.ru

Руслан Рустамович Садыков Инженер ООО «Автодороги и сооружения», г. Казань,
Российская Федерация
E-mail: ruslan14081997@mail.ru

Айдар Радикович Галиев Инженер ПТО, ООО «СтройМост», г. Киров, Российская
Федерация
E-mail: aidargaliev05@gmail.com

Рустам Фанилевич Губайдуллин Инженер ПТО, ООО «СтройМост», г. Киров,
Российская Федерация
E-mail: rustam.gubajdullin2015@mail.ru

Information about the authors

Olga K. Petropavlovskikh senior lecturer Kazan State University of Architecture and
Engineering, Kazan, Russian Federation
Email: olga_konst@mail.ru

Aniia A. Ibragimova Engineer, LLC «Gradpraktika», Russia, Moscow, Russian Federation
E-mail: anyia13@mail.ru

Ruslan R. Sadykov Engineer, LLC «Highways and facilities», Kazan, Russian Federation
E-mail: ruslan14081997@mail.ru

Aidar R. Galiev Engineer PTD, LLC «StroyMost», Kirov, Russian Federation
E-mail: aidargaliev05@gmail.com

Rustam F. Gubaidullin Engineer PTD, LLC «StroyMost», Kirov, Russian Federation
E-mail: rustam.gubajdullin2015@mail.ru



DOI: 10.52409/20731523_2022_1_126
УДК 72.036

Идентификация архитектурных объектов индустриального наследия

Р.К. Мухитов¹, Н.М. Будкевич¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: в статье рассматриваются вопросы идентификации объектов индустриального наследия с позиции памятников промышленной архитектуры. Актуальность исследования основывается на необходимости сбережения и использования архитектурных объектов индустриального наследия в условиях неуклонного роста процесса деиндустриализации. Основная цель исследования – идентификация объектов индустриального наследия в контексте ценностного осмысления промышленной архитектуры. В число задач исследования входят:

- определение индустриального этапа в периодизации развития промышленной архитектуры;
- классификация архитектурных объектов индустриального наследия по выявленным в ходе исследования признакам.

В ходе исследования раскрыты особенности растущего интереса общества к истории и культуре, связанной с индустриальным наследием прошлого. Определены основные понятия, связанные с феноменом индустриального наследия, а также установлены хронологические, типологические признаки индустриальных объектов и их определение в западной и отечественной практике.

По результатам проведенного исследования авторами выдвинута экспертная классификация объектов индустриального наследия в зависимости от временных границ и объемно-пространственных особенностей.

Предлагается материальные носители индустриального наследия разделять на:

- 1) производственную среду - представленную совокупностью фабрично-заводских строений;
- 2) производственную инфраструктуру - с объектами хранения, энергообеспечения и транспорта;
- 3) социальную инфраструктуру - которую составляют жилые постройки и поселения организованные для обеспечения работы промышленных предприятий, а также совокупность социально-культурных и жилищно-коммунальных объектов, созданных в целях обслуживания рабочего населения.

Сделан вывод, что значимость полученных результатов для теоретико-исторических аспектов архитектуры заключается в определении индустриальных объектов не только как архитектурных памятников, но и как объектов культурного и градостроительного наследия.

Ключевые слова: история промышленной архитектуры, идентификация объектов индустриального наследия, классификация объектов индустриального наследия, Нижнетагильская хартия, Дублинские принципы.

Для цитирования: Мухитов Р. К., Будкевич Н. М. Проблемы идентификации объектов индустриального наследия//Известия КГАСУ 2022 № 1(59). С126-137.

DOI: 10.52409/20731523_2022_1_126

Identification of industrial heritage

R.K.Mukhitov¹, N.M.Budkevich¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract: The article deals with the issues of identification of industrial heritage objects from the standpoint of monuments of industrial architecture. The main purpose of this study is to identify objects of industrial heritage in the context of a valuable understanding of industrial architecture. The objectives of the research include:

- determination of the industrial stage in the periodization of the development of industrial architecture;
- analysis of the existing conceptual apparatus and systematization of international experience in determining objects of industrial heritage;
- classification of industrial heritage objects according to the features identified during the study.

The study reveals the features of the growing interest of society in the history and culture associated with the industrial heritage of the past. The basic concepts associated with the phenomenon of industrial heritage are defined, as well as chronological, typological features of industrial objects and their definition in Western and domestic practice are established.

Based on the results of the study, the authors put forward an expert classification of industrial heritage objects depending on time boundaries and volumetric and spatial features.

It is proposed to divide the material carriers of the industrial heritage into:

- 1) the production environment - represented by a set of factory buildings;
- 2) industrial infrastructure - with storage, energy supply and transport facilities;
- 3) social infrastructure - which consists of residential buildings and settlements organized to ensure the operation of industrial enterprises, as well as a set of socio-cultural and housing and communal facilities created to serve the working population.

The research materials are applicable to the theoretical and historical aspects of architecture in order to further study industrial objects from the standpoint of architectural monuments, as well as objects of cultural and urban heritage.

Keywords: history of industrial architecture, identification of industrial heritage, classification of industrial heritage, Nizhny Tagil Charter, Dublin principles.

For citation: Mukhitov R.K., Budkevich N.M. Problems of identification of industrial heritage//News KSUAE 2022 № 1(59). C126-137.

DOI: 10.52409/20731523_2022_1_126

1. Введение

Коренные изменения в конце XX века в системе промышленного производства и производственных отношений в значительной мере предопределили состояние индустриальных объектов, часть которых перестали выполнять свою прямую задачу, а подчас и вовсе оказались остановленными.

Ускоренные темпы внедрения производственных инноваций и совершенствования технических средств производства можно считать основной причиной завершения индустриальной эпохи и началом нового постиндустриального периода [1]. Вследствие этого возникла реальная угроза фактической утраты бесчисленных свидетельств индустриального прошлого – зданий и сооружений заводов и фабрик, электростанций, плотин, вокзалов и привокзальных сооружений, мостов, водонапорных башен и т.д., а в ряде случаев полного исчезновения целых промышленных секторов [2]. При этом надо отметить, что многие промышленные предприятия индустриального периода являются неотъемлемой частью исторического центра города и занимают значительную часть срединного пояса. Выполняя градоформирующую роль, промышленные объекты и рабочие поселения, в последствии, с ростом административных границ вошли в структуру города. Помимо градостроительного значения, промышленная архитектура оказала

прогрессивное влияние на формирование объектов гражданской архитектуры, предложив новую типологию гражданских и транспортных сооружений, новых конструктивных решений, строительных материалов, и технологий, что способствовало цивилизационному общественному развитию. Поэтому сегодня отмечается растущий интерес общества к истории и культуре, связанной с индустриальным наследием прошлого.

Основополагающими документами для исследования стали официальные материалы в виде хартий и сборников конгрессов и симпозиумов, выпущенные международными организациями. Наиболее важными для цели исследования являются: Нижнетагильская хартия 2003 г. (TICCIH) [3]; Дублинские принципы 2011 г. (TICCIH; ICOMOS) [4],

Эволюционное развитие подходов к сохранению наследия индустриального периода, а также описание их архитектурно-художественной и социально-культурной ценности изложены в трудах Запария В. В. [5], Холодовой Л. П. [6]. В работах Штиглиц М. С. [5] освещена современная практика реставрации и реконструкции объектов индустриального наследия.

Определению места индустриального наследия в контексте архитектурного теоретического осмысления посвящены работы Холодовой Л.П. [8], Шипициной О. А. [8,9] Исследование Снитко А. В. [11]. посвящено истории промышленно-селитебных комплексов и способам их реконструкции.

Задачи архитектурной адаптации индустриального наследия к новой функции - основа исследования Яковлева А. А. [11,12], в котором он выделяет пять уровней адаптации от градостроительного до уровня деталей. Исследование Титовой Л. О. [14], посвящено разработке сценариев архитектурной конверсии объектов промышленного наследия. Вопрос интеграции исторического производственного объекта в современную городскую среду - ключевой в работе Чайко Д. С. [15]. Результатом данного исследования является методика, определяющая направления и характер возможной интеграции.

Рассмотрение многообразия приведенных существующих разработок по теме исследования позволило выявить теоретическую неопределенность в трактовке архитектурных объектов индустриального наследия, что создает существенные сложности в идентификации объектов, предметов и иных проявлений периода индустриализации.

Принимая во внимание сформулированную проблему, цель данной работы необходимо определить, как – выявление объектов индустриального наследия в контексте ценностного осмысления промышленной архитектуры.

Для достижения поставленной цели авторы решали следующие задачи:

- определение индустриального этапа в периодизации промышленного развития;
- классификация объектов индустриального наследия по хронологическим и объемно-пространственным признакам.

При этом, в качестве объекта исследования следует выделить: приведенные западные и отечественные теоретические разработки в области исследования объектов индустриального наследия.

Предметом исследования является расширение понятийного аппарата индустриального наследия на основе предлагаемой классификации промышленных объектов.

2. Материалы и методы

Используемые в исследовании данные были получены в результате изучения и анализа материалов международных конференций, посвященных индустриальному наследию, научно-исследовательских материалов центральной научной библиотеки уральского отделения Российской Академии Наук, института истории им. Ш. Марджани Академии Наук Республики Татарстан, а также Российской государственной библиотеки.

Метод исследования основывается на комплексном подходе, включающем в себя изучение и анализ научных и литературных источников по теме исследования, а также поиск, систематизацию и обобщение источников по вопросам, связанным с выявлением ценности и сохранением объектов индустриального наследия.

3. Результаты

Постиндустриальную эпоху, которой отводится временной отрезок конца XX – начала XXI века, чаще всего связывают с процессами постепенной смены

производственного курса с машинного энергоемкого на информационно-технологический. Это, отнюдь не означает отсутствие взаимосвязи между новейшими и предшествующими технологиями, которая, как правило, выражается в преемственном развитии. Поэтому только качественный характер этих изменений дает основания утверждать о становлении информационного общества и постиндустриального этапа.

Реакцией на угрозу утраты «локальной идентичности» в сопутствующих данному этапу интенсивных глобализационных течениях, обществом популяризируются ностальгические и консервативные настроения, направленные на осознание ценности проявлений прошлого – исторические промышленные здания и сооружения с территориями, которые рассматриваются как потенциальные объекты культурного наследия индустриального периода.

Однако при оценке и выборе объекта наследия возникает проблема, что следует к нему отнести и каковы его хронологические границы в научно-техническом контексте. Очевидно, сложно точно определить момент, в который начинается та или иная трансформация общества, так как история человечества циклична, и все происходящее является следствием того, что происходило прежде. Поэтому при исследовании порой удобнее обозначать символические даты, с помощью которых можно выделять конкретные исторические периоды. Чтобы приблизиться к пониманию закономерности исторического процесса следует отразить периодизацию формирования промышленного производства, закрепленную следующими стадиями:

- Капиталистическая простая кооперация – первая стадия, с образованием рабочего объединения, основанного на ручном производстве без разделения труда.
- Мануфактура – вторая стадия после капиталистической кооперации, которая относится к одной из форм промышленного производства [16]. Предприятие, в основе которого заключены ручная ремесленная техника и разделение труда на отдельные производственные операции.
- Индустриальное производство – третья стадия, представляющая собой крупномасштабную форму промышленности [17], с осуществлением производственных процессов посредством машинной техники – тождественна понятиям фабрика, завод.
- Постиндустриальность – четвертая стадия, основанная на инновационных изменениях в системе производства [18], которые характеризуются сменой механизации автоматизацией и роботизацией с применением цифровых технологий на основе элементов ИИ.

Региональная специфика, социально-экономический климат, уровень научно-технической обеспеченности и ряд других условий способствовали неравномерному возникновению приведенных производственных этапов в разных частях света. Применительно к английской истории периодизация имеет следующую последовательность – первые два этапа охватывают XVI–XVII века и представляют собой сохранившиеся производственные архитектурно-инженерные артефакты первоначальных (доиндустриальных) форм промышленности. Первый «Чугунный мост» вблизи селения Колбрукдейл, построенный на реке Северн в 1770 годах, символизирует начало «промышленного переворота» и последующий переход к третьему (индустриальному) этапу. Условно окончание революционных процессов можно отметить возведением железнодорожной линии Манчестер - Ливерпуль в 1830 году, которая оказала значительное влияние на последующее промышленное развитие и архитектуру инженерных и производственных зданий и сооружений. Третий этап с новым уровнем развития техники, энергетики и промышленного строительства, более высокой квалификацией рабочих и авторитетом инженеров продолжался вплоть до второй половины XX века. Определенную, во многом переломную роль сыграл прорыв в производственной системе последней четверти XX века. Когда всеобъемлющее влияние информационных технологий и средств коммуникации стали показателем окончания индустриальной эры и начала нового четвертого этапа, называемого периодом постиндустриальности.

Описание исторического поэтапного развития промышленного производства, которое закреплено лишь материальными объектами (зданиями и сооружениями) в некотором смысле способствует формированию наиболее четкого хронологического

разделения, но в тоже время снижает роль влияния средовых факторов. При этом также не стоит забывать о том, что эволюционное развитие обладает свойством градиентного перехода. Причиной этого является остаточность устаревшей фазы предыдущей производственной системы, которую вбирает в себя каждый последующий период технологического развития. В представленной западной хронологии выявляется привязанность к определенным, можно сказать знаковым событиям, однако данные события вероятно уже имели место в сложившемся контексте того или иного периода. Принимая во внимание намерения одной части зарубежных исследователей закрепить поэтапное развитие за конкретными историческими датами, другая их часть придерживается мнения об относительной условности этих дат.

Отечественная историография с ее складывающимся плюрализмом мнений, создает благоприятные предпосылки для отражения всего многообразия исторической действительности [19]. В среде российских исследователей возникает тезис, согласно которому, определяющее влияние на развитие человеческой цивилизации оказывает технология, охватывающая не только инструментальную основу, но и совокупность операционных процедур, системы управления, взаимосвязь социальных и экономических последствий. Ценность этой теории заключается в выделении важнейшего значения менталитета, информационных ресурсов и свидетельств гения человеческой мысли. Такой путь позволяет наиболее объективно раскрыть основные этапы и особенности промышленного развития в России, формирование которого начинается с XVII века.

Первый этап – в условиях натурального хозяйства, характеризуется ремесленным кустарным производством. Процесс отделения ремесла от сельского хозяйства способствовал самостоятельной отрасли общественного производства – промышленности.

Второй этап – доиндустриального становления – в условиях аграрно-ремесленного развития России, характеризуется мануфактурным технологическим производством при покровительстве государства и единым хозяйственным управлением. Успехи интенсивного развития, так называемой «петровской индустриализации» первой четверти XVIII века, проявляются в укреплении монопольного положения внутри страны.

К результатам промышленного переворота, начавшегося в первой половине XIX века, обычно приписывают – третий этап – начальной индустриализации.

Определяя периодизацию развития отечественной промышленности, стоит отметить ее исключительные особенности в общемировом контексте. Расхождение вариаций становления индустриального периода в данном случае характеризуется не только более поздним переходом, но и путем, отличным от западных стран. Однако, обобщающим фактором, положившим начало индустриальному этапу, стал феномен промышленного переворота. Начавшись в 1830 г. и в основном завершившись к 1880 г., промышленная революция обеспечила технологическое развитие, совершенствование операционных процессов и системы хозяйственного управления, определив расцвет отечественной индустриализации.

Наиболее высокие темпы развития промышленности приходятся на 1910-1913-е годы. На новой технико-технологической основе было создано новое и реконструировано старое производство, ускоренными темпами происходило железнодорожное строительство, которое позволило ликвидировать изолированность регионов от центра [20]. На это время приходится расцвет и становление отечественной промышленной архитектуры, которая стала олицетворять технологический прогресс Российской Империи.

С 1917 г. процесс смены власти по результатам политического переворота привел к тяжелому социально-экономическому кризису, после которого отечественная промышленность переживала эпоху социалистической индустриализации.

В целях обеспечения дальнейшего промышленного развития страны, при наличии созданной научно-технической базы и общественно-государственной собственности, новое советское правительство встало на путь формирования мощной индустриальной базы. Единая идеология, политическая однопартийность и плановая экономика способствовали запуску нового витка в процессе индустриализации. Ведущее место в этот период было отведено созданию тяжелой индустрии, как средству производства, а именно машиностроению, металлургии, химии и энергетике. На этот период приходится образование и расцвет теории и практики советского градостроительства и архитектуры,

когда по всей стране строились целые индустриальные образования городского типа с узкой отраслевой направленностью, при этом, в сложившихся городах в массовом порядке возводились новые производственные комплексы с рабочими поселками.

Результат технической модернизации всего производственного комплекса страны, в рамках действия первых пятилетних планов (довоенного периода), способствовал выигрышу временного фактора, однако затем (в послевоенные годы) сопутствующие высокие издержки и затраты при восстановлении промышленности стали причиной снижения жизненного уровня населения и культуры. Во всяком случае, характер и итоги индустриализации СССР до сих пор не позволяют прийти к единому мнению в профессиональных кругах [21].

Пренебрежение культурой, общественным сознанием и общим менталитетом как якобы вторичными составляющими экономического и технологического развития неизбежно приводит к тупику. Данные факторы очевидно явились причиной того, что переход к новому этапу постиндустриального развития России происходил в отличие от Запада несколько позднее и датирован началом XXI века. Тем не менее, на сегодняшний день рост числа архитектурных проектов реставрации и реконструкции [22], переосмысления и повторного использования объектов индустриального наследия дает основание полагать об укреплении положения страны в системе общемировых тенденций постиндустриализации [22,23]. При этом архитектурные, градостроительные и урбанистические методики реабилитации не функционирующих заводов и фабрик все чаще становятся драйверами развития российских городов [24,25].

Значительным достижением в международном признании наследия индустриальной архитектуры стало восприятие индустриальных объектов частью всемирного наследия. Межгосударственное участие и общественные инициативы, в значительной степени способствуя созданию правовых механизмов охраны и использования объектов наследия индустриального периода, подчеркивали его особый характер, а также выделяли проблемы и угрозы, возникающие в результате изменения экономических, правовых, культурных и экологических парадигм. Сторонняя критика подлинности определения критериев для включения в реестр объектов всемирного наследия выявила определенное количество недостатков, среди которых выделялось слишком ограниченное толкование, проводимое Комитетом и Секретариатом Организации Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры (UNESCO) и представительный характер реестра объектов всемирного наследия (WHL). Объекты индустриального периода и ранее вносились в реестр, попадая в группу «культурное наследие», дополненную в дальнейшем новыми категориями. Международным научным сообществом было признано, что одна из таких категорий – «индустриальное наследие» включает в себя не только мельницы и фабрики, но и социальные и инженерные достижения, порожденные новыми технологиями. Другие виды сооружений, связанные с транспортом и энергетикой, которые обнаруживаются не только в XIX и XX-м веках, но и, например, кремниевые шахты периода неолита, римские акведуки, городские производственные компании, водные каналы, железные дороги, мосты, а также артефакты доисторических и средневековых времен». Тем самым, производство наряду с религией, философией, торговлей и социальной историей является одной из основ жизни.

Наиболее ранний переход западных стран к новой постиндустриальной фазе промышленного развития позволил накопить фундаментальную базу богатыми примерами выявления, сохранения и использования индустриальных объектов [26,28]. Материальные свидетельства индустриального периода воспринимаются здесь в контексте общекультурного наследия, а значит имеют традицию накопления, освоения, и распространения данных ценностей для общества.

В свою очередь, отечественный подход к формированию концепции «индустриальное наследие» характеризуется наибольшей приверженностью к теоретическому анализу трактовки основополагающих терминов. Между тем наблюдаются расхождения в определении теоретико-методологических основ этого феномена. Степень неразрешенности вопроса подтверждает тот факт, что уже на протяжении почти двух десятилетий в научных сборниках постоянно видоизменяются

трактовки термина «индустриальное наследие», вновь и вновь формулируются задачи и основные принципы охранной и исследовательской деятельности.

Локомотивом теоретического осмысления материальных объектов наследия индустриального периода в России изначально выступала уральская школа. Многочисленные архитектурные примеры данного исторического этапа, представленные на Урале, по большей части, свидетельства металлургической [28] и горнодобывающей промышленности, стали предметом изучения еще во второй половине XX века. Международное сотрудничество и интеграция в российскую литературу понятия «индустриальное наследие» способствовали развитию дискуссии в научных кругах. Результатом этих взаимодействий стало проведение двух конгрессов в России, организованных «Международным комитетом по сохранению индустриального наследия» (TICCIH), с последующей публикацией «Нижнетагильской хартии индустриального наследия». В этой хартии, в общем виде, сформулировано понятие – «Индустриальное наследие, состоит из останков индустриальной культуры, имеющих историческую, технологическую, социальную, архитектурную или научную ценность. К таким останкам относятся здания и механизмы, мастерские, заводы и фабрики, шахты и площадки для обработки и переработки, склады и лавки, места, производства и передачи электроэнергии, транспорт и инфраструктура, а также элементы, социальной деятельности, связанные с промышленностью, такие как жилые дома, религиозные сооружения или здания образовательных учреждений» [29].

Активное участие отечественных исследователей в совместной работе с представителями комитета позволило расширить некоторые категории основополагающего документа TICCIH. Ценностные критерии нематериальной сферы были дополнены важностью уникальных инженерных решений, как неотъемлемой части самого предприятия, его структуры, компонентов и оборудования, а также социальной значимостью, как части истории жизни рабочих, обеспечивающей важное чувство идентичности [30]. Авторами научных изысканий, индустриальное наследие представлено, прежде всего, как продукт приложения творческих сил предшествующих поколений, позволяющий современному обществу, сохранять и развивать научно-технический потенциал и социально-значимые традиции предшествующих поколений. Постулат о важности изучения как материальных, так и нематериальных проявлений индустриального периода, заключенный в основу данного документа, также содержит в себе информацию о необходимости информирования общественности о смысле и исключительности его наследия. В сформулированных положениях «Нижнетагильской хартии» предпринимается попытка повышения осведомленности общества о высокой архитектурной и культурной значимости проявлений индустриального периода, а также обосновывается положительное влияние сохранения его наследия. Кроме того, документ направлен на содействие дальнейшей дискуссии среди экспертов по сбалансированному развитию многообразия объектов индустриального наследия.

Укрепляя положение принятых ранее документов по выявлению, сохранению и использованию общемирового наследия индустриального периода совместные усилия международных организаций «Международный совет по сохранению памятников и достопримечательных мест (ICOMOS) – «Международный комитет по сохранению индустриального наследия» (TICCIH) привели к разработке «Дублинских принципов сохранения объектов индустриального наследия – сооружений, территорий и ландшафтов». Тезисное изложение данного документа сообщает о ценности индустриального этапа в истории всего человечества и его особенного статуса в современном мире. Принципы излагают информацию о содействии в составлении документации, охране, консервации и укреплении положения «индустриального наследия», как части общественного достояния по всему миру. Вобрав в себя все предыдущие наработки и заключения термин «индустриальное наследие» представлен в данном документе «участками, строениями, комплексами, территориями и ландшафтами, а также связанными с ними оборудованием, объектами или документами, которые свидетельствуют о прошлых или текущих производственных процессах, добыче и обработке сырья, а также о сопутствующей энергетической и транспортной инфраструктуре».

Дополняя положения принятой ранее Нижнетагильской хартии, принципы также акцентируют внимание не только на физических, но и на нематериальных аспектах ценности, таких как технологические новшества, устройство производственного процесса, а также результаты организационных изменений социальной и культурной жизни рабочих сообществ. К прочему, участники ICOMOS – ТИССИИ обозначили важность междисциплинарного подхода [31] к изучению объектов и предметов, включения их в списки и реестры, а также градации мер по защите и сохранению, фиксируя, таким образом, ключевые стадии в процессе преобразования ценных объектов индустриального наследия в архитектурные памятники.

4. Обсуждение

В ходе анализа и оценки международного опыта идентификации объектов индустриального наследия были определены ключевые проблемы и особенности:

1) На переходном этапе от индустриального к постиндустриальному обществу промышленность как феномен и символ уходящей эпохи постепенно проникла в культурное поле. Международное сотрудничество, координируя инициативы и разделяя ресурсы, способствовало формированию концепции «индустриальное наследие», которая в общем смысле на сегодняшний день используется для обозначения совокупности материальных и культурных останков индустриального периода.

2) Материальные объекты индустриального наследия на протяжении всего исторического периода своего существования вбирали в себя связь и преемственность социальных, культурных, технологических, экономических, экологических и прочих явлений, что позволяет утверждать о существовании процесса формирования собственной исторической и архитектурной идентичности. Учет всего комплекса объектов индустриального наследия способствует формированию единой системы, особенности которой складываются в процессе промышленного производства и отражаются представления общества о данных объектах в каждый исторический период.

3) В общемировом масштабе система промышленного производства прошла три основных этапа развития, остановившись на четвертом – постиндустриальном. Приступая к выявлению места индустриального этапа в контексте эволюционного развития промышленности, стоит отметить относительность временных границ, препятствующую точности определения каждого исторического периода. В то же время преимущество данного факта заключается в возможности проведения наиболее многогранного анализа, позволяющего приблизиться к пониманию полноты содержания исторических процессов. На сегодняшний день, индустриализация во многом понимается как революция, изменившая не только систему производства, но и структуру общества.

5. Заключение

1. Установлено, что главенствующим фактором, положившим начало индустриальному этапу, признан феномен промышленного переворота, обеспечивший технологическое развитие, совершенствование операционных процессов и системы хозяйственного управления.

2. В предлагаемой классификации объектов индустриального наследия по хронологическому признаку, выделяются следующие стадии:

а) Доиндустриальный этап - является наиболее ранним свидетельством промышленной деятельности существовавшей, вплоть до окончания XVIII века.

б) Индустриальный этап. Начавшись в конце XVIII в. технологическая трансформация, именуемая революцией, определила становление индустриального этапа, превратив его в крупномасштабную форму промышленности, с характерным исполнением производственных процессов посредством машинной техники.

в) Постиндустриальный этап, для которого характерны - ускоренный темп внедрения инноваций, появление новых материалов и глубокие изменения в производственной системе последней трети XX века. В свою очередь артефакты доиндустриального и индустриального этапа стали частью промышленного наследия, приобретая новую ценность в качестве объектов архитектурной старины.

3. Обращаясь к классификации широкого диапазона индустриального наследия по объемно-пространственным признакам, установлено, что материальные носители разделяются на:

- 1) производственную среду;
- 2) производственную инфраструктуру;
- 3) социальную инфраструктуру.

4. К объектам индустриального наследия также можно отнести объекты гражданской структуры – слободы, рабочие поселки, соцгородки и т.д. В отечественной истории промышленной архитектуры предприятия являлись, как правило, градоформирующим фактором развития городских образований.

Список литературы

1. Harfst J., Wust A., Nadler R. Conceptualizing industrial culture // *GeoScape*. 2018. Vol. 12. P. 1. (DOI: 10.2478/geosc-2018-0001)
2. Штиглиц М.С. et al. Памятники промышленной архитектуры Санкт-Петербурга. СПб: Северный паломник, 2020. 272 p.
3. TICCIN. The Nizhny Tagil charter for the industrial heritage. ICOMOS Publishing, 2003. P. 1.
4. ICOMOS – TICCIN. Principles for the Conservation of Industrial Heritage Sites, Structures, Areas and Landscapes // *The Dublin Principles*. 2011. P. 2.
5. Запарий В.В. Индустриальное наследие России: вопросы изучения и сохранения // *Индустриальное наследие как ресурс для развития. Варианты стратегий. 300+ материалы Всероссийской научно-практической конференции с между- народным участием, 3 – 4 декабря 2020 г.* 2020. P. 75–76.
6. Холодова Л.П. От “городских заповедников” к управляемому развитию исторической городской среды // *Архитектон: известия вузов*. 2019. Vol. №4 (68). P. 23.
7. Штиглиц М.С. Проблемы охраны памятников промышленной архитектуры Ленинградского авангарда // *Хан-Магомедовские чтения. Фундаментальные проблемы теории и истории архитектуры*. 2017. P. 329–337.
8. Холодова Л.П. Исторические концепты организации уральских промышленных городов // *Управленец*. 2009. Vol. 1–2. P. 39–46.
9. Шипицына, О. А., Солонина Н.С. Индустриальное наследие Екатеринбурга: опыт ревалоризации за 50 лет (1970 - 2020 гг.) // *Индустриальное наследие как ресурс для развития. Варианты стратегий. 300+ материалы Всероссийской научно-практической конференции с между- народным участием, 3 – 4 декабря 2020 г.* 2020. P. 193.
10. Солонина Н.С., Шипицына О.А. Историко-культурный потенциал индустриального наследия Среднего Урала // *Архитектон: известия вузов*. 2015. Vol. 2 (50).
11. Снитко А.В. Специфика подходов к сохранению и реконструкции архитектурных комплексов исторический промышленно-селитебной застройки // *Наука, образование и экспериментальное проектирование в МАРХИ*. 2016. P. 255–257.
12. Яковлев А.А. Индустриальная археология. Проблемы средовой адаптации // *Приволжский научный журнал*. 2012. P. 170–173.
13. Яковлев А.А. Яковлев, А.А. Архитектурная адаптация индустриального наследия к новой функции : диссертация ... кандидата архитектуры : 05.23.21. 2014.
14. Титова Л.О. Архитектурные сценарии конверсии объектов промышленного наследия (на примере текстильных предприятий 1822-1917 годов постройки в г. Москве): дис. ... канд. арх. Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва, 2017 С. 17.
15. Чайко Д.С. Современные тенденции нового использования исторических промышленных объектов // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016. Vol. 3 (45). P. 50.
16. Gil L.T. Economic crises and industrialisation in southern europe: The valencian cloth-making town of alcoi (1600 and 1800)* | Crisis económicas e industrialización en el sur de europa: La ciudad valenciana de alcoi y los tejidos de lana (1600 y 1800) // *Rev. Hist. Ind.* 2020. Vol. 29, № 80. P. 85–117. (DOI: 10.1344/rhi.v29i80.31040)
17. Lapteva E.V. et al. Industrial capitalism and its paradoxes in europe xviii – xix century

- // J. Adv. Res. Law Econ. 2019. Vol. 10, № 4. P. 1250–1257.
(DOI: 10.14505/jarle.v10.4(42).24)
18. Reisinger J., Hollinsky P., Kovacic I. Design guideline for flexible industrial buildings integrating industry 4.0 parameters // *Sustain.* 2021. Vol. 13, № 19.
(DOI: 10.3390/su131910627)
19. Айдарова Г.Н. Сохраняя наследие, обновлять исторический центр Казани // *Вестник волжского регионального отделения российской академии архитектуры и строительных наук.* 2015. P. 95–100.
20. Бакунин А.В. Основные этапы развития промышленности Урала (к вопросу о новом подходе в методологии) // *Материалы международной научной конференции ТИССИН «Сохранение Индустриального наследия Мировой опыт и Российский проблемы».* 1994. P. 78.
21. Запарий В.В. Военная промышленность в контексте социальных преобразований в России: 1917–1941 гг. // *Эпоха социалистической реконструкции идеи, мифы и программы социальных преобразований* Изд-во Урал. ун-та сборник научных трудов. 2017. P. 255.
22. Мухитов Р.К. Реконструкция городских ландшафтных объектов как средство реабилитации городского пространства (на примере протоки булак и привокзальной площади г. Казани) // *ДИЗАЙН-РЕВЮ.* 2015. P. 72–77.
23. Krasnozhen S.E. et al. Wind tower based on unexploited industrial chimneys of St. Petersburg // *Journal of Physics: Conference Series.* 2021. Vol. 1926, № 1.
(DOI: 10.1088/1742-6596/1926/1/012043)
24. Zaytseva A., Brel O., Kaizer P. Russian experience of conservation and renovation of industrial regions' heritage // *J. Environ. Manag. Tour.* 2018. Vol. 9, № 4. P. 766–770. (DOI: 10.14505/jemt.v9.4(28).09)
25. Быстрова Т.Ю. Диверсификация проектных решений в работе с индустриальным наследием в 2020-х гг. // *Индустриальное наследие как ресурс для развития. Варианты стратегий. 300+ материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 3 – 4 декабря 2020 г.* 2020. P. 29–30.
26. Alekseeva E.V. Industrial heritage: Diversity of types, ways and methods of adaptive reuse // *Ural. Istor. Vestn.* 2021. Vol. 71, № 2. P. 46–54.
(DOI: 10.30759/1728-9718-2021-2(71)-46-54)
27. Pieczka M., Wowrzeczka B. Art in post-industrial facilities—strategies of adaptive reuse for art exhibition function in Poland // *Buildings.* 2021. Vol. 11, № 10.
(DOI: 10.3390/buildings11100487)
28. Rodina O.A. Industrial heritage of metallurgists from Nizhniy Tagil // *Chernye Met.* 2018. № 1. P. 70–77. (DOI: 10.30759/1728-9718-2021-2(71)-46-54)
29. ТИССИН. The Nizhny Tagil charter for the industrial heritage. ICOMOS Publishing, 2003. P. 2.
30. Rassadina S.A. Mining provinces: Memory discourse and local identity // *J. Min. Inst.* 2017. Vol. 227. P. 603–607. (DOI: 10.25515/pmi.2017.5.603)
31. Будкевич Н.М. Междисциплинарный характер концепции “индустриальное наследие” // *Индустриальное наследие как ресурс для развития. Варианты стратегий. 300+ материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 3 – 4 декабря 2020 г. Нижний Тагил: Нижнетагильский музей-заповедник «Горнозаводской Урал», 2020. P. 25.*

References

1. Harfst J., Wust A., Nadler R. Conceptualizing industrial culture // *GeoScape.* 2018 Vol. 12. P. 1. (DOI: 10.2478/geosc-2018-0001)
2. Stieglitz M.S. et al. Monuments of industrial architecture of St. Petersburg. St. Petersburg: Northern pilgrim, 2020. 272 p.
3. ТИССИН. The Nizhny Tagil charter for the industrial heritage. ICOMOS Publishing, 2003. P. 1.

4. ICOMOS - TICCIH. Principles for the Conservation of Industrial Heritage Sites, Structures, Areas and Landscapes // The Dublin Principles. 2011. P. 2.
5. Zapariy V.V. Industrial heritage of Russia: issues of study and preservation // Industrial heritage as a resource for development. Strategy options. 300+ materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation, December 3–4, 2020, 2020. P. 75–76.
6. Kholodova L.P. From "city reserves" to the managed development of the historical urban environment // Architecton: news of universities. 2019 Vol. No. 4 (68). P. 23.
7. Stieglitz M.S. Problems of protection of monuments of industrial architecture of the Leningrad avant-garde // Khan-Magomedov readings. Fundamental problems of the theory and history of architecture. 2017. P. 329–337.
8. Kholodova L.P. Historical concepts of the organization of the Ural industrial cities // Manager. 2009 Vol. 1–2. P. 39–46.
9. Shipitsyna, O.A., Solonina N.S. Industrial heritage of Yekaterinburg: the experience of revalorization over 50 years (1970 - 2020) // Industrial heritage as a resource for development. Strategy options. 300+ materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation, December 3–4, 2020, 2020. P. 193.
10. Solonina N.S., Shipitsyna O.A. Historical and cultural potential of the industrial heritage of the Middle Urals // Architecton: university news. 2015. Vol. 2 (50).
11. Snitko A.V. The specifics of approaches to the preservation and reconstruction of architectural complexes of historical industrial and residential development // Science, education and experimental design at Moscow Architectural Institute. 2016. P. 255–257.
12. Yakovlev A.A. Industrial archeology. Problems of environmental adaptation // Privolzhsky scientific journal. 2012. P. 170–173.
13. Yakovlev A.A. Yakovlev, A.A. Architectural adaptation of industrial heritage to a new function: dissertation ... Candidate of Architecture: 05.23.21. 2014.
14. Titova L.O. Architectural scenarios for the conversion of industrial heritage objects (on the example of textile enterprises built in 1822–1917 in Moscow): dis. ... cand. arch. Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, 2017 P. 17.
15. Chaiko D.S. Modern trends in the new use of historical industrial facilities // International Research Journal. 2016. Vol. 3 (45). P. 50.
16. Gil L.T. Economic crises and industrialization in southern europe: The valencian cloth-making town of alcoi (1600 and 1800)* | Crisis economicas e industrialización en el sur de europa: La ciudad valenciana de alcoi y los tejidos de lana (1600 y 1800) // Rev. Hist. Ind. 2020 Vol. 29, No. 80. P. 85–117. (DOI: 10.1344/rhi.v29i80.31040)
17. Lapteva E.V. et al. Industrial capitalism and its paradoxes in europe xviii – xix century // J. Adv. Res. law economy. 2019 Vol. 10, No. 4. P. 1250–1257. (DOI: 10.14505/jarle.v10.4(42).24)
18. Reisinger J., Hollinsky P., Kovacic I. Design guideline for flexible industrial buildings integrating industry 4.0 parameters // Sustain. 2021 Vol. 13, No. 19. (DOI: 10.3390/su131910627)
19. Aidarova G.N. Preserving the heritage, renovating the historical center of Kazan // Bulletin of the Volga Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences. 2015. P. 95–100.
20. Bakunin A.V. The main stages of the development of the industry of the Urals (to the question of a new approach in methodology) // Proceedings of the international scientific conference TICCIH "Preservation of the Industrial Heritage of World Experience and Russian Problems". 1994. P. 78.
21. Zapariy V.V. Military industry in the context of social transformations in Russia: 1917–1941 // The era of socialist reconstruction ideas, myths and programs of social transformations Publishing house Ural. un-ta collection of scientific papers. 2017. P. 255.
22. Mukhitov R.K. Reconstruction of urban landscape objects as a means of urban space rehabilitation (on the example of the Bulak canal and the station square in Kazan) // DESIGN-REVIEW. 2015. P. 72–77.
23. Krasnozhen S.E. et al. Wind tower based on unexploited industrial chimneys of St. Petersburg // Journal of Physics: Conference Series. 2021 Vol. 1926, No. 1. (DOI: 10.1088/1742-6596/1926/1/012043)

24. Zaytseva A., Brel O., Kaizer P. Russian experience of conservation and renovation of industrial regions' heritage // J. Environ. Manag. tour. 2018 Vol. 9, No. 4. P. 766–770. (DOI: 10.14505/jemt.v9.4(28).09)
25. Bystrova T.Yu. Diversification of design solutions in working with industrial heritage in the 2020s // Industrial heritage as a resource for development. Strategy options. 300+ materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation, December 3-4, 2020, 2020. P. 29–30.
26. Alekseeva E.V. Industrial heritage: Diversity of types, ways and methods of adaptive reuse // Ural. istor. Vestn. 2021 Vol. 71, No. 2. P. 46–54. (DOI: 10.30759/1728-9718-2021-2(71)-46-54)
27. Pieczka M., Wowrzeczka B. Art in post-industrial facilities—strategies of adaptive reuse for art exhibition function in Poland // Buildings. 2021 Vol. 11, No. 10. (DOI: 10.3390/buildings11100487)
28. Rodina O.A. Industrial heritage of metallurgists from Nizhniy Tagil // Chernye Met. 2018. No. 1. P. 70–77. (DOI: 10.30759/1728-9718-2021-2(71)-46-54)
29. TICCIH. The Nizhny Tagil charter for the industrial heritage. ICOMOS Publishing, 2003. P. 2.
30. Rassadina S.A. Mining provinces: Memory discussion and local identity // J. Min. Inst. 2017 Vol. 227. P. 603–607. (DOI: 10.25515/pmi.2017.5.603)
31. Budkevich N.M. Interdisciplinary nature of the concept of “industrial heritage” // Industrial heritage as a resource for development. Strategy options. 300+ materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation, December 3-4, 2020 Nizhny Tagil: Nizhny Tagil Museum-Reserve "Gornozavodskoy Ural", 2020. P. 25.

Информация об авторах.

Ринат Киямович Мухитов, кандидат архитектуры, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г.Казань, Российская Федерация.

Email: mukhitov@list.ru

Никита Михайлович Будкевич, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г.Казань, Российская Федерация.

Email: archinik07@gmail.com

Information about the authors.

Rinat K. Mukhitov, candidate of architecture, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: mukhitov@list.ru

Nikita M. Budkevich, postgraduate student of the Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: archinik07@gmail.com

Журнал «Известия КГАСУ» выходит 4 раза в год, тиражом 500 экз. Журнал является подписным изданием и включен в электронный каталог АО «ПОЧТА РОССИИ», индекс издания – ПП890.

Авторы, являющиеся членами редколлегии и (или) подписчиками журнала, имеют преимущественное право на опубликование своих статей.

СТАТЬИ ПУБЛИКУЮТСЯ БЕСПЛАТНО.

Научная статья в полном объеме будет также размещена на официальном сайте «Известия КГАСУ» – электронном научном издании (ЭНИ) <http://izvestija.kgasu.ru/> (Свидетельство о регистрации средства массовой информации Эл № ФС 77-31046 от 25.01.2008).

Все материалы направлять по адресу: 420043, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1, Отдел ИАС НИР, комн. 79. Телефон (843) 510-46-39. Email: patent@kgasu.ru.

Известия КГАСУ
2022г, № 1 (59)

Гл. редактор: Низамов Р. К.
Учредитель и издатель:
ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»

Макет и редактирование: Нуруллина Г.И..

Адрес редакции: 420043, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1, комн. 79
Тел. для справок: (843) 510-46-39
Адрес издателя: 420043, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1, комн. 79

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.
Регистрационный номер: ПИ № ФС77-77410 от 17.12.2019г.
Индекс издания – ПП890
Электронный каталог АО «ПОЧТА РОССИИ»: <https://podpiska.pochta.ru/>
Распространение: свободная цена

Подп. к печати 24.03.2022 Формат 60×84/8
Заказ 34 Бумага тип. №1
Усл. -печ. л. 17,4 Уч.-изд. л. 17,9

Тираж 500 экз.
I завод – 100

Дата выхода в свет: 31.03.2022г.

Отпечатано в Издательстве КГАСУ: 420061, г. Казань, ул. Николая Ершова, д.31Б