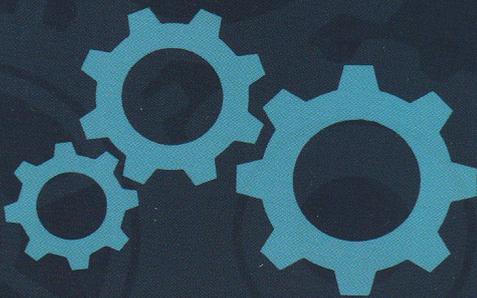
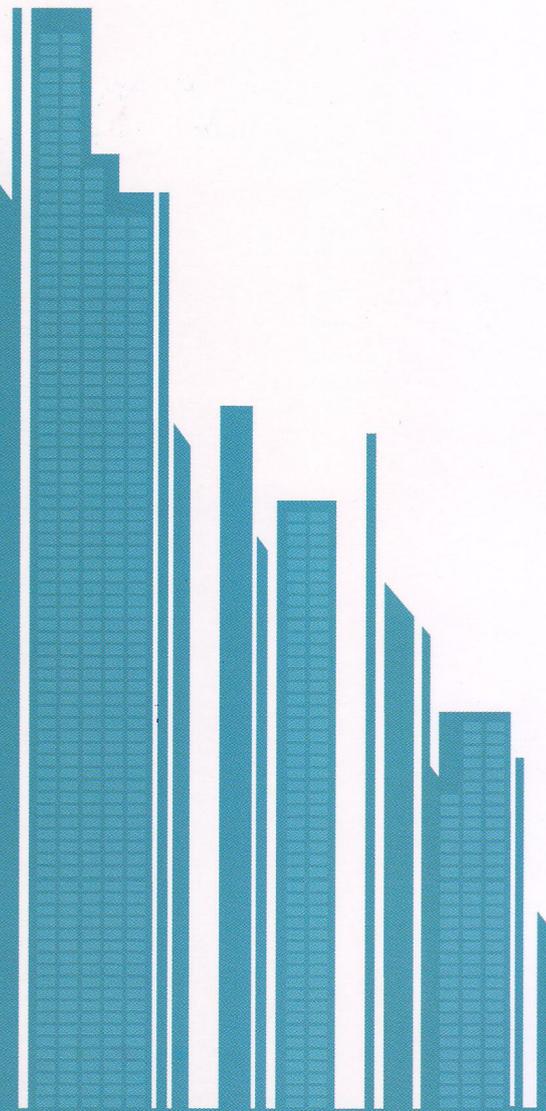


ISSN 2542-114X

# ВЕСТНИК

Поволжского государственного  
технологического университета

**1/2024**



**Материалы • Конструкции • Технологии**



<https://www.volgatech.net/>

# ВЕСТНИК

1 (29)  
2024

ПОВОЛЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Научный журнал

Выходит 4 раза в год

**СЕРИЯ «Материалы. Конструкции. Технологии»**

Журнал публикует оригинальные результаты фундаментальных и прикладных научных исследований, экспериментальных разработок в области строительства и архитектуры, машиностроения и машиноведения, технологий, машин и оборудования для лесного хозяйства и переработки древесины.

Журнал включён в систему РИНЦ, ULRICH'S PERIODICALS DIRECTORY и ПЕРЕЧЕНЬ ВАК. Все статьи, представленные в данном номере журнала, соответствуют номенклатуре специальностей научных работников

**Учредитель и издатель:**

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет».

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-68586 от 3 февраля 2017 г.).

Полное или частичное воспроизведение материалов, содержащихся в настоящем издании, допускается только с письменного разрешения редакции.

**Адрес учредителя, издателя и редакции:**

424000, РМЭ, г. Йошкар-Ола,

пл. Ленина, д. 3

Тел.: 8 (8362) 68-28-26

8 (8362) 41-08-72 (факс)

E-mail: vestnik-mkt@volgatech.net

Редакторы Л. С. Емельянова,  
П. Г. Павловская  
Компьютерная верстка  
С. Н. Эштыкова  
Дизайн обложки С. В. Ковалева  
Перевод на английский язык  
М. Н. Курдюмова

Подписано в печать 29.03.2024  
Формат 60×84 1/8. Усл. п. л. 11,16.  
Тираж 500 экз. Заказ № 2501  
Дата выхода в свет: 30.07.2024  
Цена свободная

**ISSN 2542-114X**

Поволжский государственный  
технологический университет.  
424000, РМЭ, г. Йошкар-Ола,  
пл. Ленина, д. 3

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии ООО «Вертола».  
424004, РМЭ, Йошкар-Ола,  
ул. Льва Толстого, д. 45

*Главный редактор*

**Федосов С. В.**, д-р техн. наук, проф., акад. РААСН (Москва)

*Заместители главного редактора:*

**Котлов В. Г.**, д-р техн. наук, проф. (Йошкар-Ола)

**Егоров А. В.**, д-р техн. наук, проф. (Саров)

**Шарапов Е. С.**, д-р техн. наук, проф. (Йошкар-Ола)

*Ответственный секретарь*

**Смирнов А. О.**, канд. техн. наук (Йошкар-Ола)

*Редакционный совет:*

**Королев Е. В.**, д-р техн. наук, проф. (*председатель*)  
(Санкт-Петербург)

**Травуш В. И.**, д-р техн. наук, акад. РААСН, вице-президент  
РААСН (*зам. председателя*) (Москва)

**Бальзаников М. И.**, д-р техн. наук, проф. (Самара)

**Безбородов Ю. Н.**, д-р техн. наук, проф. (Красноярск)

**Ляхович Л. С.**, д-р техн. наук, проф., акад. РААСН (Томск)

**Мелехов В. И.**, д-р техн. наук, проф. (Архангельск)

**Минаков Ю. А.**, д-р техн. наук, проф. (Йошкар-Ола)

**Митрович Радивое**, д-р наук, проф. (Белград, Республика Сербия)

**Сколубович Ю. Л.**, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. РААСН  
(Новосибирск)

*Редакционная коллегия:*

**Абдыкалыков А. А.**, д-р техн. наук, проф. (Бишкек, Кыргызская  
Республика)

**Алибеков С. Я.**, д-р техн. наук, проф. (Йошкар-Ола)

**Галимов Э. Р.**, д-р техн. наук, проф. (Казань)

**Довыденков В. А.**, д-р техн. наук, проф. (Йошкар-Ола)

**Ерофеев В. Т.**, д-р техн. наук, проф., акад. РААСН (Саранск)

**Жаданов В. И.**, д-р техн. наук, проф. (Оренбург)

**Корнилов Т. А.**, д-р техн. наук, проф. (Якутск)

**Лабудин Б. В.**, д-р техн. наук, проф. (Архангельск)

**Лагереv А. В.**, д-р техн. наук, проф. (Брянск)

**Леонович С. Н.**, д-р техн. наук, проф., иностранный член РААСН  
(Минск, Республика Беларусь)

**Маткеримов Т. Ы.**, д-р техн. наук, проф. (Бишкек, Кыргызская  
Республика)

**Павлов А. И.**, д-р техн. наук, проф. (Йошкар-Ола)

**Поздеев А. Г.**, д-р техн. наук, проф. (Йошкар-Ола)

**Полянин И. А.**, д-р техн. наук, проф. (Йошкар-Ола)

**Римшин В. И.**, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. РААСН (Москва)

**Рудобашта С. П.**, д-р техн. наук, проф. (Москва)

**Салихов М. Г.**, д-р техн. наук, проф. (Йошкар-Ола)

**Селин Р. Р.**, д-р техн. наук, проф. (Казань)

**Селяев В. П.**, д-р техн. наук, проф., акад. РААСН (Саранск)

**Угрюмов С. А.**, д-р техн. наук, проф. (Санкт-Петербург)

**Хозин В. Г.**, д-р техн. наук, проф. (Казань)

**Царев Е. М.**, д-р техн. наук, проф. (Йошкар-Ола)

# VESTNIK 1 (29) 2024

OF VOLGA STATE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Scientific journal

Is issued 4 times a year

## SERIES «Materials. Constructions. Technologies»

The journal publishes original findings from fundamental and applied research as well as experimental advancements in the fields of machine building, machine science, construction and architecture, technology, machinery, and equipment used in the forestry and wood processing industries.

The journal is indexed in the Russian Science Citation Index (RSCI) and included in Ulrich's Periodicals Directory. It is also included in the list of peer-reviewed scientific publications of the Higher Attestation Commission (HAC). All papers in this issue correspond to researcher specialisations.

### Founder and Publisher:

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volga State University of Technology».

The journal is included in the register of Federal Service for Supervision in the Sphere of Communication, Information Technology and Mass Communications (Certificate of registration ПИИ No ФС 77-68586 dated 3 February 2017).

Any use of articles without the written consent of the editorial board is strictly prohibited.

### Address:

3, Pl. Lenina, Yoshkar-Ola, Russia, 424000

Tel.: 8 (8362) 68-28-26

8 (8362) 41-08-72 (fax)

E-mail: vestnik-mkt@volgatech.net

Editors *L. S. Emelyanova,*  
*P. G. Pavlovskaya*  
Computer assisted make up  
*S. N. Eshtykova*  
Cover design *S. V. Kovaleva*  
Translation *M. N. Kurdiunova*

Passed for printing 29.03.2024  
Format 60×84 1/8. No. of press sheets 11,16.  
Printing run 500 copies.  
Order No. 2501  
Release date: 30.07.2024  
Open price.

ISSN 2542-114X

Volga State University of Technology,  
3, Pl. Lenina, Yoshkar-Ola, Russia, 424000

Printed from the original layout  
at LLC «Vertola»  
424004, Yoshkar-Ola,  
45, Leo Tolstoy St.

### Editor-in-Chief

**Fedosov S. V.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof., Full Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS) (Moscow)

### Vice Editor-in-Chief:

**Kotlov V. G.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Yoshkar-Ola)

**Egorov A. V.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Sarov)

**Sharapov E. S.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Yoshkar-Ola)

### Executive Secretary

**Smirnov A. O.**, Candidate of Engineering Sciences (Yoshkar-Ola)

### Editorial Board:

**Korolev E. V.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (*Chairman*) (Saint Petersburg)

**Travush V. I.**, Doctor of Engineering Sciences, Full Member of the RAACS, Vice-President of the RAACS (*Vice-chairman*) (Moscow)

**Balzannikov M. I.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Samara)

**Bezborodov Iu. N.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Krasnoyarsk)

**Korolev E. V.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Saint Petersburg)

**Liakhovich L. S.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof., Full Member of the RAACS (Tomsk)

**Melekhov V. I.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Arkhangelsk)

**Minakov Iu. A.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Yoshkar-Ola)

**Radivoje Mitrović**, Doctor, Prof. (Belgrade, Republic of Serbia)

**Skolubovich Iu. L.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof., Corresponding Member of the RAACS (Novosibirsk)

### Editorial team:

**Abdykalykov A. A.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Bishkek, Kyrgyz Republic)

**Alibekov S. Ia.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Yoshkar-Ola)

**Galimov E. R.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Kazan)

**Dovydenkov V. A.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Yoshkar-Ola)

**Erofeev V. T.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof., Full Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS) (Saransk)

**Zhadanov V. I.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Orenburg)

**Kornilov T. A.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Yakutsk)

**Labudin B. V.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Arkhangelsk)

**Lagerev A. V.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Bryansk)

**Leonovich S. N.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof., Foreign Member of the RAACS (Minsk, Republic of Belarus)

**Matkerimov T. I.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Bishkek, Kyrgyz Republic)

**Pavlov A. I.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Yoshkar-Ola)

**Pozdeev A. G.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Yoshkar-Ola)

**Polianin I. A.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Yoshkar-Ola)

**Rimshin V. I.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof., Corresponding member of the RAACS (Moscow)

**Rudobashka S. P.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Moscow)

**Salikhov M. G.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Yoshkar-Ola)

**Safin R. R.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Kazan)

**Seliaev V. P.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof., Full Member of the RAACS (Saransk)

**Ugrumov S. A.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Saint Petersburg)

**Khozin V. G.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Kazan)

**Tsarev E. M.**, Doctor of Engineering Sciences, Prof. (Yoshkar-Ola)

СОДЕРЖАНИЕ		CONTENTS	
Представляем членов редакционного коллектива <i>Корнилов Терентий Афанасьевич</i>	5	Presentation of the editorial board <i>Kornilov Terentii Afanasevich</i>	
<b>МАТЕРИАЛЫ</b>		<b>MATERIALS</b>	
<i>Смирнов А. О., Добшиц Л. М., Анисимов С. Н., Лешканов А. Ю.</i> Влияние доли песка в смеси заполнителей на свойства самоуплотняющихся бетонных смесей	7	<i>Smirnov A. O., Dobshits L. M., Anisimov S. N., Leshkanov A. Iu.</i> The impact of the amount of sand in the aggregate mixture on the properties of self-compacting concrete mixtures	
<i>Обухова С. Ю., Королев Е. В., Гладких В. А.</i> Влияние углеродного наномодификатора на процессы старения полимерно- модифицированных вяжущих. Часть II: Практическое исследование	18	<i>Obukhova S. Iu., Korolev E. V., Gladkikh V. A.</i> The effect of carbon nanomodifier on the ageing processes of polymer modified binders. Part II: Practical research	
<b>КОНСТРУКЦИИ</b>		<b>CONSTRUCTIONS</b>	
<i>Корнилов Т. А., Докторов И. А.</i> Теплотехнические свойства цокольного перекрытия деревянных домов из МХМ-панелей	34	<i>Kornilov T. A., Doctorov I. A.</i> Thermal properties of the basement floor in wooden houses made from MHM-panels	
<i>Римшин В. И., Трунцов П. С., Кислова В. В., Кислова Е. В.</i> Оценка напряженно-деформированного состояния конструкций здания натурными испытаниями в период эксплуатации	47	<i>Rimshin V. I., Truntov P. S., Kislova V. V., Kislova E. V.</i> Assessment of the stress-strain state of building structures by field tests during operation	
<i>Алейникова М. А., Сойту Н. Ю.</i> Особенности расчета надежности поврежденных стальных конструкций	58	<i>Aleynikova M. A., Soyту N. Iu.</i> Reliability assessment of damaged steel structures	
<i>Бикбаев Р. А., Ежов Е. Ф.</i> Разработка теоретической модели для построения линий влияния вертикальных перемещений сечения трехшарнирной арки	66	<i>Bikbaev R. A., Ezhov E. F.</i> Development of the theoretical model to construct the lines of influence of vertical displacements in a three-hinged arch section	
<b>ТЕХНОЛОГИИ</b>		<b>TECHNOLOGIES</b>	
<i>Лассана Д., Саинова В. Н.</i> Разработка эффективной технологии очистки сточных вод кожевенных предприятий	76	<i>Lassana D., Sainova V. N.</i> Development of an effective technology for wastewater treatment at tannery enterprises	
<i>Поздеев А. Г., Кузнецова Ю. А., Котлов В. Г., Гаджиев Г. М.</i> Гидромеханическая аналогия для вычисления кинематических параметров жидкого моля	86	<i>Pozdeev A. G., Kuznetsova Iu. A., Kotlov V. G., Gadzhiev G. M.</i> Hydromechanical analogy for calculating kinematic parameters of liquid moles	
<b>ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ</b>	95	<b>INSTRUCTIONS FOR AUTHORS</b>	

## Представляем членов редакционного коллектива



### **КОРНИЛОВ Терентий Афанасьевич**

*член редколлегии журнала*

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Проектирование, строительство и технологии», руководитель проектов Инженерно-технического института Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова, один из ведущих специалистов республики в области строительства.

Окончив инженерно-технический факультет Якутского государственного университета, в 1982 г. начал трудовую деятельность в ПО «Якутмежсовхозстрой». В 1983 г. Т. А. Корнилов был приглашен на работу в лабораторию надежности стальных конструкций при научно-исследовательском секторе Якутского госуниверситета. Здесь при его непосредственном участии проведены комплексные исследования строительных конструкций обогатительных фабрик и других объектов крупных промышленных компаний «Якуталмаз», «Якутэнерго», «Якутуголь» и др., внедрены проекты по реконструкции данных объектов, разработан ряд отраслевых документов по правилам эксплуатации и реконструкции промышленных зданий и сооружений.

В 1985 г. поступил в заочную аспирантуру института ЦНИИПроектстальконструкция и под руководством И. Д. Грудева в мае 1989 г. успешно защитил кандидатскую диссертацию. В последующем д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН Василий Васильевич Филиппов и д.т.н., профессор, советник РААСН Иван Дмитриевич Грудев сыграли огромную роль в формировании личности и становлении Т. А. Корнилова как высококвалифицированного специалиста в области строительства.

В 1991 г. возглавил кафедру строительных конструкций и проектирования ЯГУ. В 1999 г. переведен в Академию наук Республики Саха (Якутия) помощником президентом-руководителем аппарата президиума академии. В 2002 г. избран деканом инженерно-технического факультета ЯГУ, а в 2012 г. назначен директором Инженерно-технического института СВФУ, на базе которого под его руководством создана научно-технологическая платформа для развития науки и инженерного образования: открыты новые направления подготовки специалистов, организованы и модернизированы учебно-научные лаборатории, созданы мастерские, инновационный учебно-производственный полигон, компьютерный центр, аккредитованный испытательный центр. Все это позволяет проводить практико-ориентированную подготовку студентов, научно-прикладные исследования на современном уровне и эффективно внедрять свои разработки. В институте проводится активная политика по трансферту технологий, поиску новых эффективных технологий строительства из местного сырья, строительству энергоэффективных домов в районах республики. По итогам деятельности за 2011, 2012 гг. Инженерно-техническому институту присвоено звание «Лучшее учебное подразделение СВФУ», а в 2015 г. за высокие показатели в образовательной и инновационной деятельности институт занесен в Книгу Почета СВФУ.

Т. А. Корнилов является автором 120 научных работ и 9 патентов. В 2010 г. успешно защитил докторскую диссертацию на тему «Повышение надежности конструкций зданий и сооружений в условиях экстремальных нагрузок и воздействий Севера». Под его руководством защищены три кандидатские диссертации, в настоящее время он руководит работой

пяти аспирантов, возглавляет научное направление, связанное с проблемами тепловой защиты зданий в экстремальных условиях Крайнего Севера.

Под руководством Корнилова в 2022-2023 гг. выполнены работы по Государственному заказу РС(Я) по теме «Разработка научно обоснованных решений в проектировании, строительстве и эксплуатации арктических поселений, отвечающих современным стандартам устойчивого развития и комфортности проживания. Этап 1» в рамках комплексных научных исследований (2-й этап). По их результатам опубликованы статьи в научных журналах, получены патенты и разработаны стандарты организаций (СТО), которые внедряются в строительном комплексе республики. С 2020 г. под руководством Т. А. Корнилова проводятся исследования по технологическому проекту № 6 «Устойчивость и безопасность зданий, инженерных сооружений и арктических поселений. Разработка научно обоснованных решений в проектировании, строительстве, эксплуатации и новых материалов на Севере» Научно-образовательного центра «Север. Территория устойчивого развития».

Кроме научно-педагогической деятельности, Т. А. Корнилов как руководитель проектов активно работает с крупными строительными компаниями «Сэттэ», «Якутпромстрой», «Прометей», «Речной порт «Якутск» и др. по решению проблем строительства зданий в криолитозоне. Начаты комплексные исследования температурного режима грунтов основания многоэтажных зданий г. Якутска при их принудительном охлаждении с помощью холодильной установки. Под руководством Т. А. Корнилова выполнены и внедрены проекты жилых и производственных зданий, построены и сданы в эксплуатацию малоэтажные энергоэффективные дома в сельской местности, многоквартирные жилые дома для сотрудников СВФУ в г. Якутске и другие объекты.

В 2012-2022 гг. Т. А. Корнилов был членом Президиума Совета УМО вузов РФ по образованию в области строительства и Правления Международной ассоциации строительных высших учебных заведений. В 2020 г. избран действительным членом Академии наук Республики Саха (Якутия). Т. А. Корнилов – член диссертационного совета 24.2.396.02 (Д 212.306.04) по техническим и физико-математическим наукам в СВФУ имени М. К. Аммосова, комиссии по присуждению Государственной премии РС(Я) имени Г. И. Чиряева в области науки и техники и имени В. П. Ларионова в области науки и техники молодым ученым и специалистам, Научно-технического совета при Министерстве строительства РС(Я) и Администрации г. Якутска, председатель НТС при СРО «Союз строителей Якутии». В 2023 г. Т. А. Корнилов подтвердил 7-й уровень квалификации как главный инженер проекта (Специалист по организации архитектурно-строительного проектирования) и включен в национальный реестр специалистов НОПРИЗ под № 10.01500.01.00003674.28.

**Государственные награды и звания:**

Заслуженный строитель Республики Саха (Якутия) (2006 г.);

Почетный строитель России (2007 г.);

Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации (2009 г.);

Грамота Президента Республики Саха (Якутия) (2010 г.);

Государственная премия Республики Саха (Якутия) имени Г. И. Чиряева в области науки и технологий за разработку и внедрение энергоэффективных материалов и конструкций на основе модифицированного пенобетона для жилищного строительства (2015 г.);

Государственная премия Республики Саха (Якутия) имени С. Н. Маркина в области материального производства за внедрение новой технологии строительства с использованием стальных тонкостенных конструкций в Республике Саха (Якутия) (2020 г.).

# МАТЕРИАЛЫ

Научная статья

УДК 691.32

DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.7>

EDN: ARNNFZ

## Влияние доли песка в смеси заполнителей на свойства самоуплотняющихся бетонных смесей

А. О. Смирнов<sup>1✉</sup>, Л. М. Добшиц<sup>2</sup>, С. Н. Анисимов<sup>1</sup>, А. Ю. Лешканов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Поволжский государственный технологический университет (г. Йошкар-Ола)

<sup>2</sup>Российский университет транспорта (МИИТ) (г. Москва)

SmirnovAO@volgatech.net✉

**Аннотация.** *Введение.* Использование в современном монолитном строительстве самоуплотняющихся бетонных смесей позволяет существенно сократить трудо- и энергозатраты на их укладку, повысить качество поверхности изготавливаемых конструкций, а также ускорить темпы строительства. Самоуплотняющиеся бетонные смеси отличаются от других видов особыми требованиями к подбору состава бетона, повышенным расходом цемента и высокой стоимостью. Одной из основных задач подбора рациональных составов бетонных смесей является определение соотношения компонентов, обеспечивающего минимальный расход цемента при достижении требуемых физико-механических и эксплуатационных характеристик бетонов. Для получения высокоподвижных самоуплотняющихся бетонных смесей важно учитывать, чтобы объём цементного теста превышал объём пустот между зёрнами заполнителей для обеспечения необходимой раздвижки зёрен и снижения трения между ними.

*Цель исследования* – определение наиболее эффективного соотношения мелкого и крупного заполнителей в составе самоуплотняющихся бетонных смесей, при котором достигаются минимальная пустотность заполнителей, наилучшая удобоукладываемость бетонных смесей и наибольшая прочность бетонов.

*Материалы и методы.* В качестве мелкого заполнителя использовался природный кварцевый песок с модулем крупности 1,9, крупного – щебень из плотных горных пород фракции 5-20 мм. Составы самоуплотняющихся бетонных смесей подбирались из условия получения смесей с маркой по удобоукладываемости РК2 (расплыв стандартного конуса 66...75 см) с учетом требований ГОСТ Р 59714-2021.

*Результаты исследования.* Минимальная пустотность смеси заполнителей, наилучшая удобоукладываемость бетонных смесей и наибольшая прочность бетонов достигаются при массовой доле песка  $r = 0,45$ . Уменьшение количества песка приводит к появлению признаков расслоения и водоотделения самоуплотняющихся бетонных смесей, ухудшению структуры, снижению прочности бетонов и повышению их капиллярной пористости. Увеличение доли песка позволяет повысить стабильность, увеличить вязкость самоуплотняющихся бетонных смесей при снижении их удобоукладываемости, что приводит к уменьшению капиллярной пористости бетонов, но снижает их прочность.

*Выводы.* Установлены закономерности влияния доли песка в смеси заполнителей на свойства самоуплотняющихся бетонных смесей и бетонов. Наиболее эффективным соотношением мелкого и крупного заполнителей в составе самоуплотняющихся бетонных смесей является соотношение  $r = 0,45$ .

**Ключевые слова:** самоуплотняющийся бетон; доля песка в смеси заполнителей; пустотность заполнителей; удобоукладываемость; расслаиваемость; вязкость; прочность; водопоглощение.

**Финансирование:** авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

---

**Для цитирования:** Влияние доли песка в смеси заполнителей на свойства самоуплотняющихся бетонных смесей / А. О. Смирнов, Л. М. Добшиц, С. Н. Анисимов, А. Ю. Лешканов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2024. № 1 (29). С. 7–17. DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.7>; EDN: ARNNFZ

---

## Введение

Проблема повышения качества строительных материалов и конструкций, а также внедрения в строительный комплекс ресурсо- и энергосберегающих технологий является актуальной в современном строительстве. Так, в последние годы в современном монолитном строительстве находят широкое применение самоуплотняющиеся бетоны. Обладая повышенной удобоукладываемостью и текучестью, самоуплотняющиеся бетонные смеси способны растекаться под действием собственного веса и заполнять густоармированные конструкции без каких-либо внешних механических воздействий. Использование данных бетонных смесей позволяет существенно сократить трудо- и энергозатраты на укладку бетонных смесей, повысить производительность бетонирования железобетонных конструкций и ускорить темпы строительства.

К преимуществам самоуплотняющихся бетонов также относят:

- высокое качество поверхности изготавливаемых конструкций после их распалубки;
- улучшение сцепления бетона с арматурой и контактной зоны цементного камня с заполнителем;
- снижение проницаемости бетонов и повышение их долговечности.

Однако самоуплотняющиеся бетонные смеси отличаются от других видов бетонных смесей особыми требованиями к подбору состава бетона, повышенным расходом цемента и высокой стоимостью бетонных смесей [1–3].

## Основные идеи исследования

Концепция самоуплотняющихся бетонов была впервые разработана в Японии в 1988 году учёными Токийского университета Н. Okamura, К. Ozawa, М. Ouchi. Согласно данной концепции, большое влияние на подвижность бетонной смеси оказывает расход крупного заполнителя, который повышает трение между её составляющими и увеличивает сопротивление текучести. В связи с этим для достижения самоуплотняемости бетонных смесей требуется уменьшение расхода крупного заполнителя с соответствующим увеличением количества песка и растворной части. Так, содержание крупного заполнителя в бетонной смеси должно составлять 50 % от объёма твердых частиц, а расход песка должен равняться 40 % от объёма раствора. При этом высокая удобоукладываемость бетонной смеси может быть достигнута только при использовании эффективных суперпластификаторов, обеспечивающих снижение отношения объёма воды к объёму тонкодисперсных компонентов до 0,9...1,0 [2–6].

На данный момент наибольшей эффективностью среди пластифицирующих добавок в цементных системах обладают суперпластификаторы на основе поликарбоксилатных эфиров, позволяющие снижать водопотребность бетонных смесей до 40 %.

Поликарбоксилатные суперпластификаторы нашли распространение в нашей стране относительно недавно. В отличие от суперпластификаторов на основе

нафталиновых и меламиновых сульфонов, поликарбоксилатные суперпластификаторы характеризуются пространственным строением молекул с разветвленными боковыми цепями, что способствует более эффективной диспергации цементных флюкул за счет стерического эффекта. Данные суперпластификаторы имеют значительную водоредуцирующую и пластифицирующую способность и обеспечивают получение высокоподвижных и самоуплотняющихся бетонных смесей с высокой сохраняемостью реологических свойств [7–9].

Однако применение суперпластификаторов не обеспечивает достаточной раздвижки зёрен заполнителей, при которой самоуплотняющаяся бетонная смесь будет стойкой к расслоению. Высокая вязкость и стойкость самоуплотняющихся бетонных смесей к расслоению чаще всего достигаются за счет увеличения расхода вяжущих материалов, что приводит к удорожанию бетонных смесей, а также к повышенной экзотермии и усадке бетонов. Для снижения расхода цемента в составе самоуплотняющихся бетонных смесей целесообразно применять тонкодисперсные минеральные наполнители. В качестве минеральных добавок обычно используются побочные продукты промышленности, такие как зола-унос, доменный гранулированный шлак, микрокремнезём, а также некоторые тонкоизмельченные горные породы, например известняковый порошок [10–12].

Одной из основных задач *подбора рациональных составов бетонных смесей* является определение соотношения компонентов, обеспечивающего минимальный расход цемента при достижении требуемых физико-механических и эксплуатационных характеристик бетонов.

Для получения высокоподвижных самоуплотняющихся бетонных смесей важно учитывать, чтобы объём цементного теста превышал объём пустот между зёр-

нами заполнителей для обеспечения необходимой раздвижки зёрен и снижения трения между ними. С целью минимизации расхода цементного теста и достижения наибольшей удобоукладываемости самоуплотняющейся бетонной смеси требуется, чтобы гранулометрический состав заполнителей обеспечивал их максимальную плотность упаковки как самых дешёвых компонентов бетонной смеси. В таком случае пустоты между зёрнами заполнителей будут заполняться портландцементом и тонкодисперсными добавками, а вода станет играть роль смазки между твердыми компонентами бетонной смеси. Самоуплотняющиеся бетонные смеси, разработанные по методу плотной упаковки заполнителей, отличаются высокой удобоукладываемостью и экономичностью [13–17].

**Целью исследования** являлось определение наиболее эффективного соотношения мелкого и крупного заполнителей в составе самоуплотняющихся бетонных смесей, при котором достигаются минимальная пустотность заполнителей, наилучшая удобоукладываемость бетонных смесей и наибольшая прочность бетонов.

#### **Материалы и методы исследования**

Для приготовления самоуплотняющихся бетонных смесей в качестве вяжущего применялся портландцемент ЦЕМ I 52,5Н производства ООО «Аккерманн цемент» (г. Новотроицк). Клинкер данного цемента имел следующий минералогический состав:  $C_3S$  – 62,1 %;  $C_2S$  – 15,8 %;  $C_3A$  – 5,0 %;  $C_4AF$  – 13,2 %. В качестве пластифицирующей добавки использовался суперпластификатор на основе поликарбоксилатных эфиров Sika ViscoCrete 25 HE-C в виде водного раствора плотностью 1,08 г/см<sup>3</sup>. В качестве крупного заполнителя применялся щебень из плотных горных пород фракции 5-20 мм с маркой по дробимости 1400, истинной плотностью 3,0 г/см<sup>3</sup>, насыпной плотностью 1,56 г/см<sup>3</sup>,

пустотностью 48 %. В качестве мелкого заполнителя использовался природный кварцевый песок с модулем крупности 1,9, истинной плотностью 2,65 г/см<sup>3</sup>, насыпной плотностью 1,51 г/см<sup>3</sup>, пустотностью 43 %. Гранулометрический состав заполнителей показан в таблице 1.

Таблица 1. Гранулометрический состав заполнителей

Table 1. Granulometric composition of aggregate mixture

Показатель	Щебень	Песок
Частные остатки на ситах, %:		
20 мм	2,1	–
10 мм	58,7	–
5 мм	35,3	–
2,5 мм	3,8	1,2
1,25 мм	1,1	2,7
0,63 мм	–	20,4
0,315 мм	–	40,4
0,16 мм	–	32,1
< 0,16 мм	–	3,2

Составы самоуплотняющихся бетонных смесей подбирались из условия получения смесей с маркой по удобоукладываемости РК2 (расплыв стандартного конуса 66...75 см) с учетом требований ГОСТ Р 59714-2021 [18]. Удобоукладываемость бетонных смесей определялась по распылу конуса в соответствии с ГОСТ Р 59715-2022. По времени распыла бетонных смесей до диаметра 500 мм характеризовалась вязкость самоуплотняющихся бетонных смесей. Расслаиваемость самоуплотняющихся бетонных смесей оценивалась по визуальным индексам стабильности смесей VSI в соответствии с приложением А ГОСТ Р 59715-2022.

Из бетонных смесей изготавливались образцы-кубы размером 100×100×100 мм. В возрасте 28 суток твердения в нормальных условиях образцы подвергались механическим испытаниям. Прочность образцов определялась в соответствии с ГОСТ 10180-2012, плотность – по ГОСТ 12730.1-2020, водопоглощение – по ГОСТ 12730.3-2020.

## Результаты исследования

С целью минимизации расхода цемента в составе самоуплотняющихся бетонных смесей на первом этапе определялось наиболее рациональное соотношение мелкого и крупного заполнителей из условия достижения их минимальной пустотности. Соотношение песка и щебня в смеси заполнителей варьировалось в диапазоне от 30:70 до 60:40 массовых %.

Пустотность смеси заполнителей  $V_{п}$  определялась по формуле

$$V_{п} = \left(1 - \frac{\rho_{н}}{\rho_{и}}\right) \cdot 100,$$

где  $\rho_{н}$  – насыпная плотность смеси заполнителей, г/см<sup>3</sup>;

$\rho_{и}$  – истинная плотность смеси заполнителей, г/см<sup>3</sup>.

Насыпная плотность смеси заполнителей определялась как отношение массы заполнителей к их объему в стандартном неуплотнённом состоянии. Истинная плотность смеси заполнителей определялась расчетным путем с учетом значений истинной плотности песка 2,65 г/см<sup>3</sup> и щебня 3,0 г/см<sup>3</sup> и их долей в смеси заполнителей.

Результаты определения пустотности смеси заполнителей в зависимости от содержания песка и щебня показаны в таблице 2 и на рисунке 1.

Таблица 2. Пустотность смеси заполнителей в зависимости от содержания песка и щебня

Table 2. Voidness in aggregate mixture depending on the content of sand and crushed rock

Доля песка	Доля щебня	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	Пустотность, %
0,30	0,70	1,954	2,895	32,5
0,35	0,65	1,995	2,878	30,7
0,40	0,60	2,005	2,860	29,9
0,45	0,55	2,000	2,843	29,7
0,50	0,50	1,974	2,825	30,1
0,55	0,45	1,936	2808	31,0
0,60	0,40	1,897	2,790	32,0

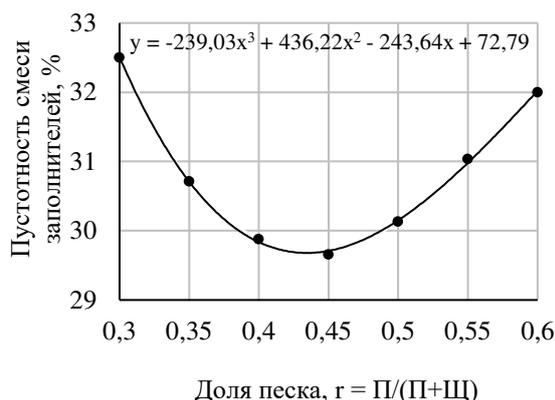


Рис. 1. Пустотность смеси заполнителей в зависимости от содержания песка и щебня

Fig. 1. Voidness in aggregate mixture depending on the content of sand and crushed rock

По результатам исследования установлено, что для применяемых заполнителей (песок с модулем крупности 1,9 и щебень фракции 5-20 мм) максимальная плотность упаковки и минимальная пустотность смеси заполнителей достигаются при массовой доле песка  $r = П/(П+Щ) = 0,45$ . При этом минимальный объем пустот смеси заполнителей составляет  $V_{пуст} = 297 \text{ л/м}^3$ . При изменении доли песка до значений  $r = 0,40$  и  $r = 0,50$  наблюдается увеличение пустотности заполнителей на 0,7 и 1,6 % соответственно. Повышение пустотности заполнителей будет приводить к перерасходу цементного теста в составе самоуплотняющихся бетонных смесей и увеличению их стоимости.

На следующем этапе исследовано влияние доли песка в наиболее рациональном диапазоне 0,4...0,5 на удобоукладываемость самоуплотняющихся бетонных смесей и физико-механические свойства бетонов.

Составы самоуплотняющихся бетонных смесей подбирались с учетом требований ГОСТ Р 59714-2021. Расход вяжущего составлял  $550 \text{ кг/м}^3$ . Дозировка суперпластификатора была принята на

основании ранее проведенных исследований и составляла 1 % от массы вяжущего [19, 20]. Расход воды был принят  $170 \text{ кг/м}^3$  из условия получения самоуплотняющихся бетонных смесей с маркой по удобоукладываемости РК2 (расплыв нормального конуса 66...75 см).

Общий объем цементного теста в составе бетонных смесей составлял  $350 \text{ л/м}^3$ . Данного объема цементного теста достаточно для заполнения пустот между зёрнами заполнителей ( $V_{пуст} = 297 \text{ л/м}^3$ ), а также для формирования необходимой прослойки цементного теста на их поверхности, повышающей способность бетонной смеси к самоуплотнению. Снижение объема цементного теста менее  $350 \text{ л/м}^3$  приведет к уменьшению раздвижки зерен заполнителей и увеличению трения между ними. При этом подвижность системы будет недостаточной для получения самоуплотняющихся бетонных смесей.

Исследуемые составы самоуплотняющихся бетонных смесей приведены в таблице 3. Соотношение песка и щебня в бетонных смесях варьировалось в диапазоне от 40:60 до 50:50 массовых %.

Таблица 3. Составы бетонных смесей с различным соотношением песка и щебня  
Table 3. Composition of concrete mixtures with different ratios of sand and crushed rock

Доля песка	Состав бетонной смеси, $\text{кг/м}^3$					В/Ц
	Ц	П	Щ	В	ПКЭ	
0,40	550	736	1104	170	5,5	0,31
0,45		828	1012			
0,50		920	920			

Результаты определения технологических свойств самоуплотняющихся бетонных смесей и физико-механических характеристик бетонов с различным соотношением заполнителей показаны в таблице 4 и на рисунке 2.

Таблица 4. Свойства самоуплотняющихся бетонных смесей и бетонов с различным соотношением заполнителей

Table 4. Properties of self-compacting concrete mixtures and concretes with different aggregate ratios

Доля песка	Свойства бетонных смесей			Свойства бетонов		
	Распływ конуса, мм	Вязкость $t_{500}$ , с	Индекс стабильности VSI	Прочность, МПа	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Капиллярная пористость, %
0,40	725	7,9	2	74,1	2515	9,6
0,45	730	8,1	1	74,9	2495	9,2
0,50	680	9,2	1	70,0	2463	9,1

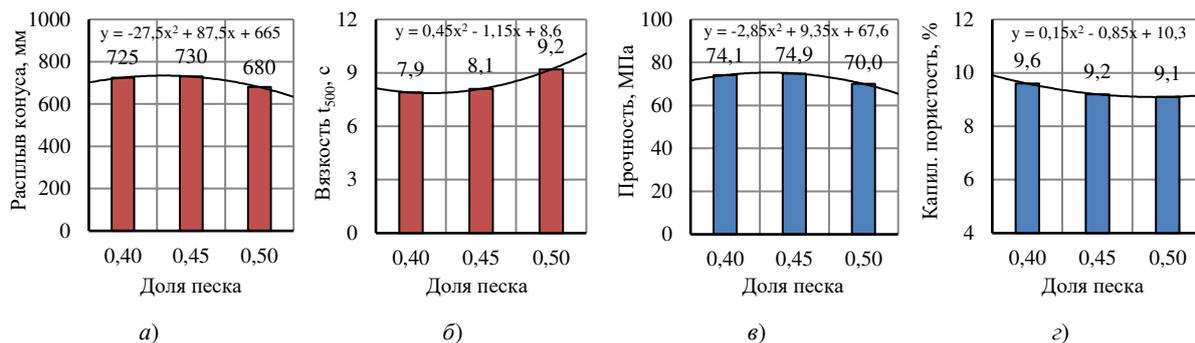


Рис. 2. Свойства самоуплотняющихся бетонных смесей и бетонов с различным соотношением заполнителей: а – распływ бетонных смесей; б – вязкость бетонных смесей; в – прочность бетонов; г – капиллярная пористость бетонов

Fig. 2. Properties of self-compacting concrete mixtures and concretes with different aggregate ratios: a – spreading of concrete mixtures; b – viscosity of concrete mixtures; c – strength of concrete; d – capillary porosity of concrete

По результатам определения удобоукладываемости бетонных смесей установлено, что полученные смеси обладают высокой текучестью с распływом конуса 680...730 мм, соответствующей марке РК2 и не требующей виброуплотнения бетонных смесей. Наилучшая удобоукладываемость бетонных смесей наблюдается при доле песка 0,45 (см. рис. 2а), что согласуется с результатами определения минимальной пустотности смеси заполнителей.

Уменьшение доли песка до значения 0,40, несмотря на снижение удельной поверхности и водопотребности заполнителей, не приводит к повышению подвижности бетонных смесей. Это связано с уменьшением объема растворной составляющей бетонной смеси, снижением раздвижки зёрен щебня и увеличением трения между ними. При этом уменьшение

количества песчаной фракции приводит к снижению стабильности бетонных смесей, появлению признаков их расслоения и водоотделения (VSI = 2, табл. 4).

При увеличении доли песка до значения 0,50 наблюдается повышение стабильности бетонных смесей, однако вместе с тем происходит резкое увеличение вязкости бетонных смесей на 14 % (см. рис. 2б) и снижение их удобоукладываемости на 7 %. Это связано с увеличением удельной поверхности заполнителей и снижением толщины прослойки цементного геля между ними.

По результатам определения физико-механических свойств самоуплотняющихся бетонов установлено, что наибольшая прочность бетонов в возрасте 28 суток также достигается при доле песка 0,45 (см. рис. 2в). Уменьшение доли песка до значения 0,40 приводит лишь к незначи-

тельному снижению прочности бетонов на 1 %. Также по результатам определения объёмного водопоглощения бетонов установлено, что снижение доли песка приводит к ухудшению структуры самоуплотняющихся бетонов и повышению их капиллярной пористости на 4 % (см. рис. 2з). Увеличение доли песка с 0,45 до 0,50 позволяет снизить капиллярную пористость бетонов на 1 %, в то же время вместе с этим наблюдается уменьшение прочности бетонов на 7 %.

На основе анализа полученных результатов можно сделать следующие **выводы**:

1. Установлены закономерности влияния доли песка в смеси заполнителей на свойства самоуплотняющихся бетонных смесей и бетонов.

2. Выявлено, что наиболее эффективным соотношением мелкого и крупного заполнителей в составе самоуплотняю-

щихся бетонных смесей (при использовании песка с модулем крупности 1,9 и щебня фракции 5-20 мм), при котором достигаются минимальная пустотность заполнителей, наилучшая удобоукладываемость бетонных смесей и наибольшая прочность бетонов, является соотношение  $r = 0,45$ .

3. Уменьшение количества песка приводит к появлению признаков расслоения и водоотделения самоуплотняющихся бетонных смесей, ухудшению структуры, снижению прочности бетонов и повышению их капиллярной пористости.

4. Увеличение доли песка позволяет повысить стабильность, увеличить вязкость самоуплотняющихся бетонных смесей при снижении их удобоукладываемости, что приводит к уменьшению капиллярной пористости бетонов, но снижает их прочность.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самоуплотняющийся мелкозернистый бетон для ремонта стыков сборных железобетонных каркасов / С. Н. Анисимов, А. Ю. Лешканов, А. О. Смирнов, А. А. Анисимова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2022. № 4. С. 7-14.
2. Okamura H., Ouchi M. Self-Compacting Concrete // Journal of Advanced Concrete Technology. 2003. Vol. 1, no. 1. P. 5-15.
3. Brouwers H. J. H., Radix H. J. Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study // Cement and Concrete Research. 2005. Vol. 35, no. 11. P. 2116-2136.
4. A review on mixture design methods for self-compacting concrete / C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, D. Wang, Z. Huang, Z. Fang // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 84. P. 387-398.
5. Калашников В. И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // Строительные материалы. 2008. № 10. С. 4-6.
6. Несветаев Г. В., Лопатина Ю. Ю. Проектирование макроструктуры самоуплотняющейся бетонной смеси и её растворной составляющей // Наукоедение: интернет-журнал. 2015. Т. 7, № 5(30). С. 1-14.
7. Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer / K. Yamada, T. Takahashi, S. Hanehara, M. Matsuhisa // Cement and Concrete Research. 2000. Vol. 30, no. 2. P. 197-207.
8. Chemical admixtures – Chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability / J. Plank, E. Sakai, C. W. Miao, C. Yu, J. X. Hong // Cement and Concrete Research. 2015. Vol. 78. P. 81-99.
9. Влияние поликарбоксилатных суперпластификаторов на структурообразование цементных паст / Л. М. Добшиц, О. В. Кононова, С. Н. Анисимов, А. Ю. Лешканов // Фундаментальные исследования. 2014. № 55. С. 945-948.
10. Juenger M. C. G., Siddique R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete // Cement and Concrete Research. 2015. Vol. 78. P. 71-80.
11. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design / C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, D. Wang, Z. Huang, Z. Fang // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 101. P. 741-751.
12. Самоуплотняющиеся бетоны нового поколения на основе местных сырьевых ресурсов /

О. В. Тараканов, В. И. Калашников, Е. А. Белякова, Р. Н. Москвин // Региональная архитектура и строительство. 2014. № 2. С. 47-53.

13. Optimum design of low-binder Self-Compacting Concrete based on particle packing theories / W. Zuo, J. Liu, Q. Tian, W. Xu, W. She, P. Feng, C. Miao // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 163. P. 938-948.

14. Sustainable design and ecological evaluation of low binder self-compacting concrete / W. J. Long, Y. Gu, J. Liao, F. Xing // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 167. P. 317-325.

15. Lin W. T. Effects of sand/aggregate ratio on strength, durability, and microstructure of self-compacting concrete // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 242. P. 118046.

16. Smirnov A., Dobshits L., Anisimov S. Development of high-strength self-compacting concrete with low fineness modulus sand // IOP Conference Series: Materials Science and

Engineering. 2020. Vol. 869. P. 032039.

17. Богданов Р. Р., Ибрагимов Р. А., Королев Е. В. Оптимизация фракционного состава смеси заполнителей для самоуплотняющегося бетона // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 4(50). С. 327-335.

18. Новый национальный стандарт на самоуплотняющиеся бетонные смеси / С. С. Каприелов, А. В. Шейнфельд, И. А. Арзуманов, И. А. Чилин // Вестник НИЦ «Строительство». 2021. № 3(30). С. 30-40.

19. Smirnov A., Dobshits L., Anisimov S. Effect of superplasticizer and silica fume on the properties of self-compacting mortars // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 896. P. 012095.

20. Смирнов А. О. Самоуплотняющийся бетон с комплексной органоминеральной добавкой: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2021. 180 с.

Статья поступила в редакцию 30.04.2024; одобрена после рецензирования 16.05.2024; принята к публикации 03.06.2024

### Информация об авторах

*СМИРНОВ Александр Олегович* – кандидат технических наук, доцент кафедры строительных технологий и автомобильных дорог, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов – разработка модифицированных самоуплотняющихся бетонов с пониженным расходом цемента. Автор более 40 научных публикаций. E-mail: SmirnovAO@volgatech.net

*ДОБШИЦ Лев Михайлович* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных материалов и технологий, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва. Область научных интересов – долговечность железобетонных конструкций, морозостойкость бетонов, специальные добавки. Автор более 110 научных публикаций. E-mail: levdobshits@yandex.ru

*АНИСИМОВ Сергей Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры строительных технологий и автомобильных дорог, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов – разработка модифицированных бетонов для зимнего бетонирования. Автор более 70 научных публикаций. E-mail: AnisimovSN@volgatech.net

*ЛЕШКАНОВ Андрей Юрьевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры строительных технологий и автомобильных дорог, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов – разработка бетонов с комплексными модификаторами; тепловлажностная обработка пластифицированных бетонов. Автор более 40 научных публикаций. E-mail: LeshkanovAI@volgatech.net

**Вклад авторов:** авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 691.32

DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.7>

EDN: ARNNFZ

### The impact of the amount of sand in the aggregate mixture on the properties of self-compacting concrete mixtures

A. O. Smirnov<sup>1</sup>, L. M. Dobshits<sup>2</sup>, S. N. Anisimov<sup>1</sup>, A. Iu. Leshkanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola),

<sup>2</sup>Russian University of Transport (MIIT) (Moscow)

SmirnovAO@volgatech.net<sup>✉</sup>

**Abstract.** *Introduction.* Self-compacting concrete has become increasingly popular in contemporary monolithic construction in recent years. By using self-compacting concrete, construction projects can be completed faster, with better surface quality and lower labour and energy costs involved in laying concrete mixtures. Self-compacting concrete mixtures, however, are more expensive, require more cement, and have unique design specifications for concrete mixes in comparison with other types of concrete mixtures. Finding the optimal component ratio that ensures the lowest amount of cement consumption while maintaining the necessary performance, mechanical, and physical properties of concrete is one of the primary tasks of developing rational compositions of concrete mixtures. In order to achieve the appropriate grain expansion and lower friction between the aggregate grains, it is crucial to consider that the amount of cement mixture exceeds the volume of voids between the grains in order to generate highly mobile self-compacting concrete mixtures.

*The aim of the research* was to determine the most effective ratio of fine and coarse aggregates in self-compacting concrete mixture composition in order to minimise aggregate intergranular porosity, optimise mixture workability, and maximise concrete strength.

*Materials and methods.* Natural quartz sand with a particle size modulus of 1.9 was used as fine aggregate. Crushed rock with a fraction of 5-20 mm was used as a coarse aggregate. The compositions of self-compacting concrete mixtures were selected from the condition of obtaining mixtures with workability grade RK2 (spread of a standard cone 66...75 cm) based on the requirements of GOST R 59714-2021.

*Research results* reveal that the lowest intergranular porosity of aggregates, the best workability of concrete mixtures, and the highest strength of concrete are all attained with a sand to aggregate ratio of  $r = 0.45$ . Reduced sand content deteriorates the structure, causes self-compacting concrete mixtures to segregate and bleed, reduces the strength of the concrete, and increases its capillary porosity.

Increasing the proportion of sand makes it possible to enhance stability and the viscosity of self-compacting concrete mixtures while reducing their workability, which leads to a decrease in the capillary porosity of concrete and as a result weakens the mixture strength.

*Conclusion.* It has been determined how the ratio of sand to aggregate affects the characteristics of self-compacting concrete mixtures and concretes. It was discovered that the ratio  $r = 0.45$  represents the most efficient combination of fine and coarse particles in self-compacting concrete mixtures.

**Keywords:** self-compacting concrete; sand to aggregate ratio; intergranular aggregate porosity; workability; segregation; viscosity; compressive strength; water absorption.

**Funding:** this research received no external funding.

---

**For citation:** Smirnov A. O., Dobshits L. M., Anisimov S. N., Leshkanov A. Iu. The impact of the amount of sand in the aggregate mixture on the properties of self-compacting concrete mixtures. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies.* 2024;(1):7–17. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.7>; EDN: ARNNFZ

---

## REFERENCES

1. Anisimov S. N., Leshkanov A. Ju., Smirnov A. O., Anisimova A. A. Self-compacting fine-grained concrete for repairing precast concrete frame joints. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies*. 2022;(4):7-14. (In Russ.).
2. Okamura H., Ouchi M. Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2003;1(1):5-15.
3. Brouwers H. J. H., Radix H. J. Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study. *Cement and Concrete Research*. 2005;35(11):2116-2136.
4. Shi C., Wu Z., Xiao J., Wang D., Huang Z., Fang Z. A review on mixture design methods for self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2015;84:387-398.
5. Kalashnikov V. I. Design of compositions of high-strength self-compacting concrete. *Stroitel'nye materialy*. 2008;(10):4-6. (In Russ.).
6. Nesvetaev G. V., Lopatina Ju. Ju. Design of macrostructure of self-compacting concrete and its mortar component. *Naukovedenie: Internet-zhurnal*. 2015;7(5):1-14. (In Russ.).
7. Yamada K., Takahashi T., Hanehara S., Matsuhisa M. Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer. *Cement and Concrete Research*. 2000;30(2):197-207.
8. Plank J., Sakai E., Miao C. W., Yu C., Hong J. X. Chemical admixtures – Chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability. *Cement and Concrete Research*. 2015;78:81–99.
9. Dobshic L. M., Kononova O. V., Anisimov S. N., Leshkanov A. Ju. The structure of the cement past polycarboxylate superplasticizers influence. *Fundamental research*. 2014;(55):945-948. (In Russ.).
10. Juenger M. C. G., Siddique R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*. 2015;78:71-80.
11. Shi C., Wu Z., Xiao J., Wang D., Huang Z., Fang Z. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Construction and Building Materials*. 2015;101:741-751.
12. Tarakanov O. V., Kalashnikov V. I., Beljakova E. A., Moskvina R. N. Self compacting concrete of new generation based on local raw materials. *Regional architecture and engineering*. 2014;(2):47-53. (In Russ.).
13. Zuo W., Liu J., Tian Q., Xu W., She W., Feng P., Miao C. Optimum design of low-binder Self-Compacting Concrete based on particle packing theories. *Construction and Building Materials*. 2018;163:938-948.
14. Long W. J., Gu Y., Liao J., Xing F. Sustainable design and ecological evaluation of low binder self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2017;167:317-325.
15. Lin W. T. Effects of sand/aggregate ratio on strength, durability, and microstructure of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2020;242:118046.
16. Smirnov A., Dobshits L., Anisimov S. Development of high-strength self-compacting concrete with low fineness modulus sand. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;869:032039.
17. Bogdanov R. R., Ibragimov R. A., Korolev E. V. Optimization of the fractional composition of the aggregate mixture for self-compacting concrete. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2019;(4):327-335. (In Russ.).
18. Kaprielov S. S., Shejfel'd A. V., Arzumanov I. A., Chilin I. A. New national standard for self-compacting concrete mixes. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2021;(3):30-40. (In Russ.).
19. Smirnov A., Dobshits L., Anisimov S. Effect of superplasticizer and silica fume on the properties of self-compacting mortars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;896:012095.
20. Smirnov A. O. Self-compacting concrete with complex organomineral additive: dis. ... kand. tehn. nauk. Moscow; 2021. 180 p. (In Russ.).

The manuscript was submitted on 30.04.2024; reviewed on 16.05.2024;  
adopted for publication on 03.06.2024

**Information about the authors**

*SMIRNOV Alexandr Olegovich* – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Technologies and Roads, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Research interests – development of modified self-compacting concrete with reduced cement consumption. Author of more than 40 publications. E-mail: SmirnovAO@volgatech.net

*DOBSHITS Lev Mikhailovich* – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Building Materials and Technologies, Russian University of Transport (MIIT), Moscow. Research interests – durability of reinforced concrete structures, frost resistance of concrete, special additives. Author of more than 110 publications. E-mail: levdobshits@yandex.ru

*ANISIMOV Sergei Nikolaevich* – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Technologies and Roads, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Research interests – development of modified concretes for winter concrete pouring. Author of more than 70 publications. E-mail: AnisimovSN@volgatech.net

*LESHKANOV Andrei Iurevich* – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Technologies and Roads, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Research interests – development of complex modified concretes; heat and moisture treatment of plasticized concrete. Author of more than 40 publications. E-mail: LeshkanovAI@volgatech.net

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this paper.

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest.

The authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

Научная статья

УДК 691.16

DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.18>

EDN: ZWNARG

## Влияние углеродного наномодификатора на процессы старения полимерно-модифицированных вяжущих. Часть II: Практическое исследование

С. Ю. Обухова<sup>1</sup>✉, Е. В. Королев<sup>2</sup>, В. А. Гладких<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (г. Москва)

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (г. Санкт-Петербург)

<sup>3</sup>Научно-исследовательский и испытательный центр «МГСУ СТРОЙ-ТЕСТ» (г. Москва)

ShehovtsovaSYU@mgsu.ru✉

**Аннотация.** *Введение.* Применение полимерно-модифицированных вяжущих является распространенным способом улучшения качества асфальтобетона и, как следствие, продления долговечности автомобильных дорог. Однако для данной группы материалов характерен важный недостаток, который не позволяет полностью использовать потенциал модифицированных вяжущих. Проблема заключается в их склонности к старению, что закономерно приводит к преждевременному разрушению покрытий автомобильных дорог. Перспективным направлением, нацеленным на устранение данного недостатка, является применение наномодификаторов.

*Цель работы* – изучение влияния одностенных углеродных нанотрубок на структурообразование таких вяжущих в период эксплуатационных воздействий (старение).

*Методы.* При подборе оптимального состава вяжущего, модифицированного полимером СБС, одностенными углеродными нанотрубками и углеводородным пластификатором, предварительно были определены гомогенизация и динамическая вязкость. Далее проведено моделирование процесса старения в лабораторной печи по методу RTFOT (печь для прокатки тонкопленочных материалов) и PAV (сосуд для выдержки под давлением). Исследованы зависимости вязкоупругих свойств от компонентного состава вяжущих. Установлены верхний и нижний пределы диапазона эксплуатационных температур. Исследованы релаксационные процессы в наномодифицированных полимерно-битумных вяжущих.

*Результаты.* Установлено, что введение одностенных углеродных нанотрубок в полимерно-битумное вяжущее увеличило вязкость расплава, что согласуется с представлениями об изменении вязкости дисперсно-наполненных систем с увеличением объемной концентрации дисперсной фазы, которая в исследуемом диапазоне концентрации может быть описана реологическим линейным уравнением А. Эйнштейна. Определено оптимальное содержание одностенных углеродных нанотрубок (0,001 %), полимера СБС (3,5 %), отработанного углеводородного пластификатора (4 %) в составе вяжущего, которые обеспечивают улучшение производительности модифицированного вяжущего с PG (52–22) до марки PG (64–34).

*Выводы.* Одностенные углеродные нанотрубки обеспечивают улучшение параметра долговечности  $\Delta T_c$  вяжущего на 150 %, улучшение релаксационных свойств при низких температурах и устойчивость к усталостным разрушениям.

**Ключевые слова:** битум; полимер-модифицированное вяжущее; старение; реология; усталостное растрескивание; релаксация, долговечность.

**Финансирование:** авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

---

Для цитирования: Обухова С. Ю., Королев Е. В., Гладких В. А. Влияние углеродного наномодификатора на процессы старения полимерно-модифицированных вяжущих. Часть II: Практическое исследование // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2024. № 1 (29). С. 18–33. DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.18>; EDN: ZWNARG

---

## Введение

Полимерно-модифицированные вяжущие (ПМВ) представляют собой материал, состоящий из рационально подобранного соотношения нефтяного дорожного битума, стирол-бутадиен стирольного полимера и пластификатора (при необходимости) [1-3]. Дополнительно в своем составе ПМВ могут содержать поверхностно-активные вещества, противостарители, нано- и микроразмерные минеральные добавки [4-7]. Их применение направлено на улучшение качества ПМВ. Однако стоит отметить, что наряду с положительным эффектом их применение значительно усложняет систему, делает ее менее стабильной и, как следствие, более подверженной процессам расслаивания и возможному ускорению старения [8].

Для устранения существующих проблем при применении ПМВ используют различные наномодификаторы. Ранее [5] с помощью электронной микроскопии асфальтеносмолистых комплексов нами был установлен физический эффект, заключающийся в следующем: введение углеродных нанотрубок в битум приводит к увеличению дисперсности асфальтеносмолистых комплексов, в результате происходит образование структурных элементов (физических барьеров), препятствующих коагуляции асфальтеносмолистых комплексов. На основе этого знания мы предполагаем, что указанный эффект (препятствие углеродными нанотрубками коагуляции асфальтеносмолистых комплексов) будет способствовать замедлению эксплуатационного процесса старения полимерно-битумных вяжущих. Последнее, как говорилось ранее в первой, теоретической части нашего исследования [9], согласно представлениям R. N. Traxler и K. H. Gusfeldt [10, 11], осно-

вано на физических процессах, связанных с формированием надмолекулярных структур, происходящих вследствие коагуляции асфальтенов, и последующим переходом битума из структуры золь в структуру гель. Данная работа направлена на установление влияния углеродных нанотрубок на долгосрочное старение полимерно-битумного вяжущего, а также дополнение различных выводов о влиянии углеродных нанотрубок совместно с полимером SBS и углеводородным пластификатором на протекающие долгосрочные процессы старения. Это исследование призвано помочь получить представления о возможных характеристиках, возникающих при наномодифицировании полимерно-битумных вяжущих под воздействием старения в масштабе вяжущего.

**Материалы и методы исследования**  
**Исходные материалы и их характеристики.** Углеродные нанотрубки – одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ), полученные методом термического испарения графита в присутствии Ni-Cr катализатора в электрической дуге (Arc ОУНТ), содержащего наночастицы графита длиной 20-100 нм и наночастицы металла диаметром 5 нм. Одностенные углеродные нанотрубки синтезированы в РАН (г. Черноголовка, Россия).

Пластификатор – отработанное масло индустриальное (минеральное) марки И-40А SN 300, производства ООО «Пушкинский завод», Московская обл., г. Пушкино. Отработанное индустриальное масло – это маловязкая жидкость, представляющая собой сложную смесь углеводородов парафинового, нафтенового и ароматических рядов, отвечает требованиям ГОСТ 20799-88. Свойства и требования к маслу представлены в таблице 1.

Таблица 1. Физические и химические свойства отработанного индустриального масла И-40А SN 300  
Table 1. Physical and chemical properties of spent industrial oil I-40A SN 300

Свойства	Требования ГОСТ 20799-88	Фактические значения
Кинематическая вязкость при 40 °С, мм <sup>2</sup> /с	61-75	75
Кислотное число мг КОН на 1 г масла,	<0,05	0,035
Зольность, %,	<0,005	0,004
Массовая доля серы в маслах из сернистых нефтей, %,	<1.1	0,9
Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	<900	890
Температура вспышки, °С	≥220	242

Полимер – стирол-бутадиенстирольный СБС Л 30-01А. Термоэластопласт линейный бутадиен-стирольный представляет собой продукт блоксополимеризации стирола и бутадиена в растворе углеводов в присутствии литийорганического катализатора, опудрен стеаратом кальция или диоксидом крем-

ния. Характеристики полимера СБС Л 30-01А соответствуют промышленному стандарту ТУ 38.40327–98 предприятия-производителя ОАО «Воронежсинтезкаучук», г. Воронеж, Россия. Основные физические и химические свойства исследуемого полимера СБС Л 30-01А представлены в таблице 2.

Таблица 2. Физические и химические свойства полимера СБС Л 30-01А

Table 2. Physical and chemical properties of polymer SBS L 30-01A

Свойства	Фактические значения	Методы исследования
Вязкость в 5,23 % растворе толуола при 25 °С, сСт	14±5	ГОСТ Р 53708 /ASTM D 445
Массовая доля летучих веществ, % масс.	≤ 0,8	ГОСТ Р 54546 /ASTM D 5668
Массовая доля золы, % масс	≤ 0,3	ГОСТ Р 54545 /ASTM D 5667
Содержание связанного стирола, % масс.	30±1,5	Внутренний метод поставщика
Условная прочность при растяжении, МПа	15	ГОСТ Р 54554 /ASTM D 3182
Модуль упругости при удлинении 300 % , МПа	2,7	ГОСТ Р 54554 /ASTM D 3182
Относительное удлинение при разрыве, %	700	ГОСТ Р 54554 /ASTM D 3182

Битум – нефтяной дорожный битум марки PG 52-22, производства ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез», г. Кстово, Россия. Битум был протестирован на соответствие требованиям рос-

сийского государственного стандарта ГОСТ Р 58400.1–2019. Результаты лабораторных испытаний физико-механических свойств битума приведены в таблице 3.

Таблица 3. Физические и химические свойства битума PG 52-22

Table 3. Physical and chemical properties of bitumen PG 52-22

Наименование показателя	Требования ГОСТ Р 58400.1-2019	Фактические значения
Исходное битумное вяжущее		
Температура вспышки, °С	≥ 230	249
Динамическая вязкость при температуре 135 °С	≤ 3 Па·с	0,83
Сдвиговая устойчивость $G^*/\sin \delta$ при 10 рад/с при температуре испытания 52 °С	≥ 1 кПа	2,03
Битумное вяжущее, состаренное по методу RTFOT		
Сдвиговая устойчивость $G^*/\sin \delta$ при 10 рад/с при температуре испытания 52 °С	≥ 2,2 кПа	2,93
Битумное вяжущее, состаренное по методу PAV		
Температура старения по PAV, °С	90	90
Усталостная устойчивость $G^* \cdot \sin \delta$ при 10 рад/с при температуре испытания 19 °С	≤ 5000 кПа	546
Низкотемпературная устойчивость: жесткость, $S$ , при температуре -12 °С	≤ 300 МПа	154
Низкотемпературная устойчивость: параметр $m$ , при температуре испытания -12 °С	≥ 0,300	0,311

**Методика приготовления наномодифицированного полимерно-битумного вяжущего.** В ходе выполнения ряда поисковых экспериментов, включающих кон-

троль потерь наномодифицированных дисперсных систем «пластификатор – углеродные нанотрубки» при пробоподготовке, использование различного оборуду-

дования для отвешивания компонентов, различные технологические этапы объединения компонентов полимерно-битумного вяжущего, были установлены оптимальные технологические параметры

приготовления полимерно-битумных вяжущих с наномодифицированными дисперсными системами, обеспечивающие получение статистически значимых результатов (рис. 1).

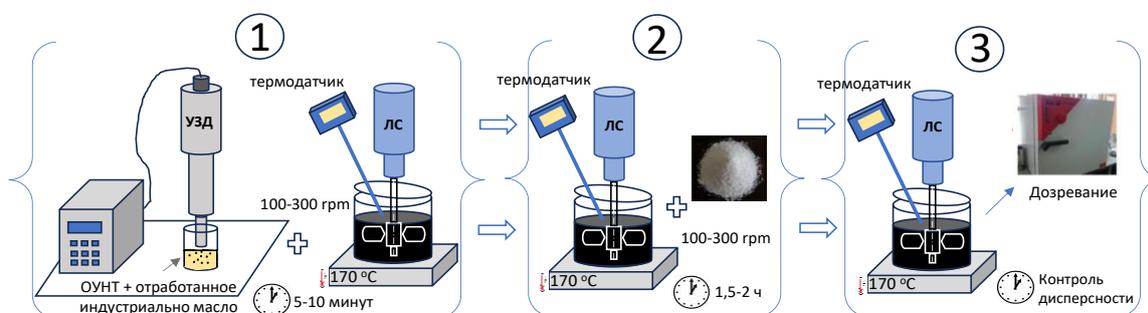


Рис. 1. Схематичное изображение технологии приготовления наномодифицированного полимерно-битумного вяжущего (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Schematic representation of the technology of preparation of nanomodified polymer-bitumen binder (prepared by the authors)

1) На первом этапе предварительно готовится наномодифицированная дисперсная система «отработанный углеводородный пластификатор – углеродные нанотрубки» с помощью погружного ультразвукового диспергатора (УЗД) Vibra Cell до достижения гомогенного состояния. Предварительно было установлено, что продолжительность ультразвукового диспергирования зависит от процентного содержания углеродных нанотрубок и находится в диапазоне 2–5 мин [5]. Далее битум разогревается в емкости с герметичной крышкой до рабочей температуры 160–170 °С. Затем в емкость погружаются лопастный смеситель (ЛС) ИКА и датчик контроля подвода тепла. Включается смеситель со скоростью 100–300 грм, и медленно вводится дисперсная система «отработанный углеводородный пластификатор – углеродные нанотрубки» в течение 2–3 минут. Далее система перемешивается в течение 5–10 минут.

2) На втором этапе по истечении времени в битум, содержащий наномодифицированную дисперсную систему, начинают медленно вводить полимер в течение 3–10 минут при скорости пере-

мешивания 100 грм. По истечении времени скорость смесителя увеличивают до 300 грм, емкость с модифицированным полимерно-битумным вяжущим герметично закрывают с датчиком температуры для контроля подвода тепла и перемешивание ведется до достижения гомогенизации полимера в объеме битума.

3) На третьем этапе при достижении гомогенизации полимера в объеме вяжущего перемешивание завершается. Наномодифицированное полимерно-битумное вяжущее помещается в сушильный шкаф при температуре 135 °С для «дозревания», что обеспечит стабилизацию структуры вяжущего. Стадия «дозревания» осуществляется в течение 1–2 часов.

**Характеристики полимерного наномодифицированного вяжущего. Подбор оптимального соотношения компонентов полимерного наномодифицированного вяжущего (ПНМВ).** При строительстве автомобильных дорог в центральной части Российской Федерации общепринято использовать марку модифицированного битума PG 64–34. Поэтому при подборе оптимального со-

отношения компонентов наномодифицированного полимерно-битумного вяжущего показатели качества данной

марки являлись базовыми. Для этого были приготовлены следующие составы композиций (табл. 4).

Таблица 4. Составы модифицированных полимерно-битумно вяжущих  
Table 4. Compositions of modified polymer-bitumen binders

№ состава	Компоненты наномодифицированного полимерно-битумного вяжущего, %				Гомогенизация ПНМВ
	Битум PG 52-16	Отработанное масло	СБС Л 30-01А	ОУНТ	
1	100	4,0	2,5	-	да
2	100	4,0	2,5	0,001	да
3	100	4,0	2,5	0,005	да
4	100	4,0	3,5	-	да
5	100	4,0	3,5	0,001	да
6	100	4,0	3,5	0,005	да
7	100	4,0	4,5	-	да
8	100	4,0	4,5	0,001	да
9	100	4,0	4,5	0,005	да
10	100	4,0	5,5	-	нет
11	100	4,0	5,5	0,001	нет
12	100	4,0	5,5	0,005	нет

При подборе оптимального соотношения компонентов наномодифицированного полимерно-битумного вяжущего предварительно экспертно определили гомогенизацию (табл. 4). Для этого осуществили визуальную оценку, а также с помощью стеклянной палочки определяли наличие видимых нерастворенных частиц полимера. Образцы № 10, 11 и 12 не прошли данное испытание и в дальнейшем в работе не учитывались.

После приготовления для всех образцов модифицированных вяжущих была проведена проверка динамической вязкости с помощью ротационного вискозиметра. Если динамическая вязкость составляла менее 3 Па·с при температуре испытания 135 °С, то этот образец использовался для дальнейших исследований. Если вязкость составляла более 3 Па·с, образец не использовался в дальнейших испытаниях.

Определение влияния рецептуры на свойства модифицированного битумного вяжущего осуществляется методами, указанными в ГОСТ Р 58400.1-2019 и ГОСТ Р 58400.2–2019 (в соответствии с AASHTO M 320).

#### *Исследование краткосрочных процессов старения, протекающих в наномодифицированных полимерно-битумных вяжущих. Высокотемпературные характеристики*

1. Испытание битума на динамическую вязкость проводилось для измерения его сопротивления текучести и оценки обрабатываемости. Вязкость при вращении при 135 °С определяли с помощью вискозиметра Брукфилда. При температуре 135 °С отбирали 10,5 г битума и вращали его с помощью шпинделя S27.

2. Сдвиговую вязкость определяли на динамическом реометре сдвига DSR. Исследования проводились с использованием приставки – «два диска», диаметр прокладки составлял 25 мм (в соответствии с AASHTO M 320).

3. Устойчивость к пластической деформации определялась по показателю, учитывающему модуль сдвига  $G^*$  и фазовый угол  $\delta - G^*/\sin(\delta)$ . Испытания исходного связующего и состаренного по методу RTFOT в печи проводились в соответствии с методологией, изложенной

в ГОСТ Р 58400.10 (в соответствии с AASHTO T 315).

4. Для установления *верхнего предела диапазона рабочих температур* наномодифицированного битумного вяжущего (класс PG X) была определена максимальная температура, при которой ПНМВ может сохранять необходимые свойства, в соответствии с методологией, изложенной в ГОСТ Р 58400.3–2019 (в соответствии с AASHTO R 29).

5. Для изучения *колеобразующих свойств* полимерно-битумных вяжущих, модифицированных ОУНТ, был проведен тест MSCR на определение восстановления ползучести при многократных напряжениях (Multiple stress creep recovery) в соответствии с AASHTO T-350. Испытания проводились при двух уровнях напряжения 0,1 и 3,2 кПа. В результате теста MSCR были получены показатели ползучести  $J_{nr}$  (кПа<sup>-1</sup>) и процент восстановления  $R$  (%) наномодифицированных полимерно-битумных вяжущих. Для определения показателей ползучести и восстановления было применено по 10 циклов. Показатели определялись при каждом цикле нагружения. Показатель ползучести  $J_{nr}$  рассчитывался по формуле

$$J_{nr}^n = \frac{\varepsilon_r^n - \varepsilon_0^n}{\tau_0}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_r^n$  – величина деформации в конце фазы восстановления;

$\varepsilon_0^n$  – начальное значение деформации в начале участка ползучести;

$\tau_0$  – значение уровня напряжения, используемого в цикле нагружения.

Процент восстановления  $R$  рассчитывался по формуле

$$R^n = \frac{\varepsilon_c^n - \varepsilon_r^n}{\varepsilon_c^n - \varepsilon_0^n}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_c^n$  – величина деформации в конце участка ползучести;

$n$  – номер цикла.

**Исследование долгосрочных процессов старения, протекающих в наномодифицированных полимерно-битумных вяжущих. Низкотемпературные характеристики.** Низкотемпературные и усталостные характеристики определялись для образцов полимерно-битумных вяжущих, состаренных по методу PAV (Pressure Aging Vessel). Старение PAV представляет собой метод старения под действием давления и температуры. Это позволяет имитировать процесс старения в течение периода эксплуатации в дорожном покрытии от 5 до 10 лет. Долгосрочное старение осуществлялось в камере под давлением 2,1 МПа в течение 20 часов при температуре 100 °С.

1. *Низкотемпературные характеристики* были определены на реометре, изгибающим балочку (BBR), при температуре -24 °С. Модуль жесткости ( $S$ ) характеризует сопротивляемость постоянным нагрузкам, а параметр  $m$  – скорость ее изменения. Битумное вяжущее будет обеспечивать устойчивость к низкотемпературному растрескиванию в том случае, если одновременно станут выполняться два условия:  $S \leq 300$  МПа и  $m \geq 0,3$  при длительности нагрузки 60 с.

2. *Усталостное растрескивание (когезионное растрескивание)* было определено на реометре динамического сдвига (DSR) по ГОСТ Р 58400-2019 при температуре 19 °С.

3. Для установления *нижнего предела диапазона рабочих температур* (класс PG Y) была установлена минимальная температура, при которой вяжущее, состаренное по методу PAV, может сохранять способность к релаксации напряжений в соответствии с методологией, изложенной в ГОСТ Р 58400.3–2019 (в соответствии с AASHTO R 29).

Для каждого процентного содержания полимера и углеродных нанотрубок приготовлено и протестировано не менее трех образцов. Максимальное отклонение от среднего значения не превышало 5 %.

**Исследование релаксационных процессов в наномодифицированных полимерно-битумных вяжущих.** В соответствии с термодинамическими представлениями любая система стремится перейти к своему равновесному состоянию с соответствующими внешними условиями. Поэтому логично предположить, что физико-химические изменения, протекающие в полимерно-битумных вяжущих в процессе эксплуатации, связаны с переходом структуры в более равновесное термодинамическое состояние.

Традиционно температура изготовления асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог составляет 150-160 °С. Скорость охлаждения асфальтобетонной смеси до 60 °С при этом будет находиться в интервале 0,5-1,5 °С/мин. Эта скорость больше требуемой для установления равновесного состояния структуры в высоковязкой системе полимерно-битумного вяжущего при эксплуатационных температурах. Поэтому для достижения системой равновесного состояния необходимо время, которое называется временем релаксации.

В процессе эксплуатации температура битумных вяжущих постоянно меняется, что значительно усложняет протекание тепловых релаксационных процессов, а это в свою очередь способствует образованию структуры, которая отличается от

той структуры, которая была сформирована после протекания релаксационных процессов при какой-либо постоянной температуре. Следствием формирования равновесных структур в полимерно-модифицированных битумах является их гетерогенизация, которая в некоторых случаях может закончиться синерезисом [12]. В процессе протекания релаксации в битумах изменяются все свойства.

Для оценки потенциала релаксации в полимерно-битумных вяжущих в данной работе использовали параметр долговечности  $\Delta T_c$ . Впервые данный параметр был предложен М. Anderson [13] для исследования потери растяжимости состаренного битумного вяжущего, характеризующей взаимосвязь между свойствами битума и трещинами в асфальтобетонном покрытии, которые не связаны с нагрузкой. Данный параметр  $\Delta T_c$  предлагается использовать как критерий оценки потери релаксационных свойств битумных вяжущих. Он определяется по следующей формуле [13]:

$$\Delta T_c = T_{c(s)} - T_{c(m)}, \quad (3)$$

где  $T_{c(s)}$  – изомодульная температура, °С;  
 $T_{c(m)}$  – критическая температура, °С.

Изомодульная температура  $T_{c(s)}$  рассчитывается при условии равенства жесткости  $S$  величине 300 МПа:

$$T_{c(s)} = T_1 + \left[ \frac{\log(300) - \log(S_2)}{\log(S_1) - \log(S_2)} \cdot (T_1 - T_2) \right] - 10, \quad (4)$$

где  $T_1$  – наименьшая температура, при которой выполняются оба условия:  $S \leq 300$  МПа и  $m \geq 0,3$ , °С;

$T_2$  – наибольшая температура, при которой выполняется одно из условий:  $S \leq 300$  МПа и  $m \geq 0,3$ , °С;

$S_1$  – жесткость, определяемая в течение 60 с при температуре  $T_1$ ;

$S_2$  – жесткость, определяемая в течение 60 с при температуре 2;

$m_1$  – параметр  $m$  при температуре 1;

$m_2$  – параметр  $m$  при температуре  $T_2$ .

Критическая температура  $T_{c(m)}$ , характеризующая способность вяжущего к релаксации напряжений, рассчитывается при параметре  $m = 0,3$  по формуле

$$T_{c(m)} = T_1 + \left[ \frac{\log(300) - \log(S_2)}{\log(S_1) - \log(S_2)} \cdot (T_1 - T_2) \right] - 10. \quad (5)$$

Величина  $\Delta T_c \neq 0$  будет характеризовать не только долговечность, но и изменение релаксационных свойств битумного

вяжущего в процессе протекания физико-химических процессов его старения. Чем больше величина  $\Delta T_c$ , тем выше склон-

ность битумного вяжущего к старению, и, как следствие, ухудшается его релаксационная способность.

### Результаты исследования

Битум – материал, чувствительный к температуре, поэтому его вязкость служит одной из важных характеристик, которая является мерой внутреннего трения, влияющей на обрабатываемость смеси. Вязкость базовых и модифицированных углеродными нанотрубками ПБВ при температуре 135 °С представлена в таблице 5.

При введении углеродных наномодификаторов остается проблема обеспечения равномерности их распределения в объеме вяжущего. Поэтому для установления равномерности распределения ОУНТ образцы для определения вязкости брали из верхней и нижней частей.

Таблица 5. Динамическая вязкость (верх/низ) модифицированных полимерно-битумных вяжущих при 135 °С

Table 5. Dynamic viscosity (top/bottom) of modified polymer-bitumen binders at 135 °С

№ состава	Требования ГОСТ Р 58400.1–2019 (ASTM D6373)	Фактические значения
1	$\leq 3$ Па·с	0,99/-
2	$\leq 3$ Па·с	1,23/1,22
3	$\leq 3$ Па·с	1,27/1,27
4	$\leq 3$ Па·с	1,07/-
5	$\leq 3$ Па·с	1,57/1,57
6	$\leq 3$ Па·с	1,59/1,59
7	$\leq 3$ Па·с	1,09/-
8	$\leq 3$ Па·с	1,58/1,59
9	$\leq 3$ Па·с	1,59/1,60

Анализ данных таблицы 5 показывает, что используемая технология приготовления ПБВ, модифицированного ОУНТ, позволяет обеспечить равномерность распределения наномодификатора в объеме. Так, разница в динамической вязкости образцов, взятых из верхней и нижней частей, составляет не более 1 %. Установлено, что добавление углеродных нанотрубок (составы ПНМВ № 2, 3, 5, 6, 8 и 9) увеличивает вязкость битумно-полимерной основы. Увеличение вязкости

объясняется закономерным влиянием дисперсной фазы, которая в исследуемом диапазоне концентрации может быть описана реологическим линейным уравнением А. Эйнштейна [14].

Компенсировать увеличение вязкости модифицированного вяжущего возможно посредством увеличения температуры приготовления, так как битум является классическим термопластическим веществом, вязкость расплава которого снижается с ростом температуры. Однако данные таблицы 5 демонстрируют, что вязкость модифицированного углеродными нанотрубками полимерно-битумного вяжущего соответствует требованиям спецификаций Supergravel (ASTM D6373) и является достаточно текучей для перекачки во время работы асфальтосместительной установки.

**Высокотемпературные характеристики.** Тест на определение сдвиговой вязкости был использован для изучения влияния одностенных углеродных нанотрубок на характеристики полимерно-битумных вяжущих при высокой рабочей температуре. Результаты испытаний, т. е. сдвиговая устойчивость к пластической деформации, которая способствует стойкости к образованию пластических колеи и соответствующие им температуры разрушения, показаны на рисунках 2 и 3.

Сдвиговая устойчивость  $G^*/\sin\delta$  для несостаренных образцов должна быть не менее 1,0 кПа, а для образцов, подверженных кратковременному старению по методу RTFOT, – 2,2 кПа. Данные рисунка 3а демонстрируют, что в образцах ПБВ с содержанием полимера 3,5 % введение одностенных углеродных нанотрубок в количестве 0,001 и 0,005 % (составы № 5 и № 6) позволяет улучшить сдвиговую устойчивость до 21 %. Дополнительно к этому ОУНТ дают возможность получить более прочную и стабильную структуру ПНМВ к краткосрочному процессу старения. Так, после старения по методу RTFOT сдвиговая устойчивость для этих образцов не изменилась.

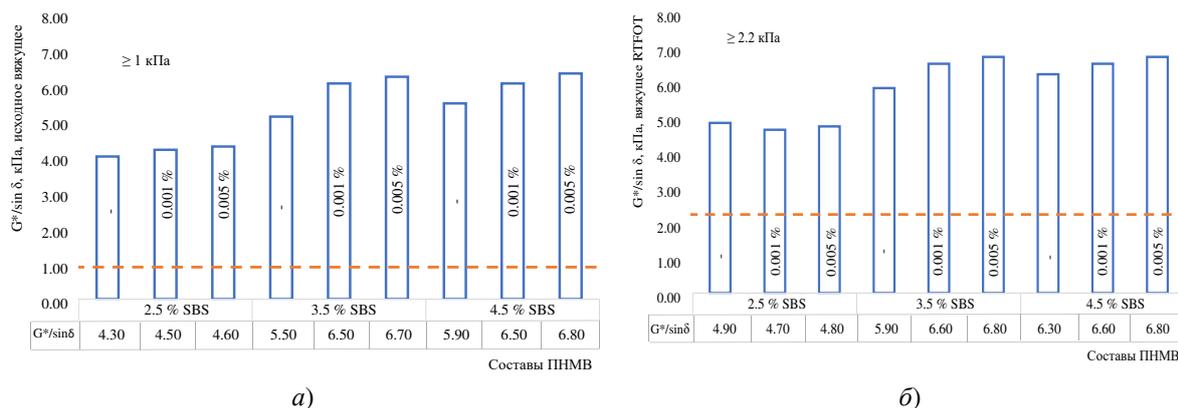


Рис. 2. Влияние одностенных углеродных нанотрубок на сдвиговую устойчивость:

а – оригинального модифицированного вяжущего;

б – модифицированного вяжущего, состаренного по методу RTFOT

Fig. 2. The effect of single-walled carbon nanotubes on the shear stability of:

а – the original modified binder; б – modified binder aged by the RTFOT method

Введение одностенных углеродных нанотрубок в образцы ПБВ с большим содержанием полимера 4,5 % (составы № 8 и № 9) также позволяет улучшить сдвиговую устойчивость до 15 % относительно базового состава № 7. При этом такое увеличение содержания полимера не вносит значимых изменений в сравнении с наномодифицированными образцами (№ 5 и № 6). На основании сказанного можно заключить, что при подборе оптимального состава наномодифицированного вяжущего не всегда большее количество полимера в совокупности с наномодификатором будут

обеспечивать улучшение свойств ПБВ [15].

При подборе оптимальных модифицированных составов следует не только исходить из качественной составляющей, но и учитывать экономическую точку зрения. С позиции экономической целесообразности перспективными являются образцы ПНМВ (составы № 5 и № 6), которые продемонстрировали также высокую устойчивость к образованию пластических колея при высоких температурах (см. рис. 2). Более того, при этом улучшились эксплуатационные свойства вяжущих при высоких температурах (см. рис. 3).

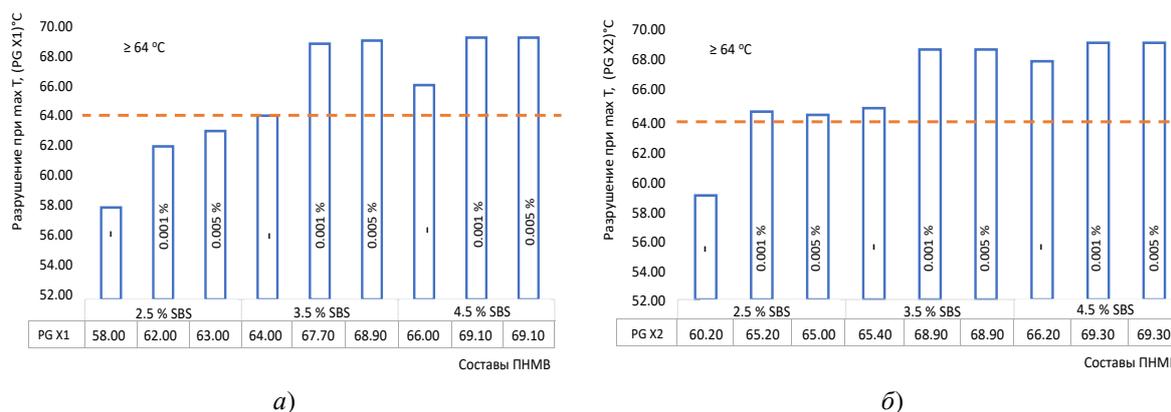


Рис. 3. Влияние одностенных углеродных нанотрубок на температуру разрушения при воздействии высоких температур: а – оригинального модифицированного вяжущего;

б – модифицированного вяжущего, состаренного по методу RTFOT

Fig. 3. The effect of single-walled carbon nanotubes on the fracture temperature when exposed to high temperatures: а – the original modified binder; б – modified binder aged by the RTFOT method

Результаты испытаний показали, что эксплуатационные свойства модифицированных вяжущих при высоких температурах повысились с PG 52 до PG 64 при содержании полимера 3,5 % и ОУНТ 0,001 и 0,005 % (составы № 4, 5 и 6).

Согласно условию данной работы наномодифицированное полимерно-битумное вяжущее должно соответство-

вать марке PG 64-34. Проведенные исследования показали, что составы № 1, № 2 и № 3 не соответствуют этому условию.

Для дальнейшего изучения колееобразующих свойств полимерно-битумных вяжущих, модифицированных ОУНТ, был проведен тест Multiple stress creep recovery (MSCR). В таблице 6 приведены краткие результаты этого теста.

Таблица 6. Результаты испытания «Multiple stress creep recovery» (Восстановление ползучести при многократных напряжениях)

Table 6. The results of the "Multiple stress creep recovery" test (Creep recovery at multiple stresses)

№ состава	$J_{nr}$ , кПа <sup>-1</sup>			R, %	
	0,1 кПа	3,2 кПа	$J_{nr}$ % Diff	0,1 кПа	3,2 кПа
4	3,247	3,635	9,5	0,60	0,26
5	1,289	1,388	9,90	2,90	0,90
6	1,275	1,384	10,20	2,90	0,90
7	2,738	2,914	7,40	1,30	0,45
8	1,265	1,384	10,20	2,97	0,96
9	1,265	1,384	10,20	2,97	0,96

Согласно результатам теста, представленным в таблице 6, введение одностенных углеродных нанотрубок (составы № 5, 6, 8 и № 9) значения  $J_{nr}$  (ползучести) как при уровне напряжения 0,1 кПа, так и при напряжении 3,2 кПа постепенно снижаются. Причем независимо от содержания ОУНТ в исследуемом диапазоне 0,001 % (№ 5 и 8) и 0,005 % (№ 6 и 9) эти образцы наномодифицированного полимерно-битумного вяжущего характеризуются наименьшим значением  $J_{nr}$ , что указывает на значи-

тельное улучшение устойчивости к образованию колеи. Результаты восстановления  $R$  показывают, что модифицированные одностенными углеродными нанотрубками ПБВ восстанавливаются больше, чем базовый состав ПБВ (№ 5 и 7) в циклах восстановления.

**Низкотемпературные и усталостные характеристики.** Низкотемпературные характеристики модифицированного одностенными углеродными нанотрубками ПБВ (значения жесткости  $S$  и параметра  $m$ ) представлены на рисунке 4.

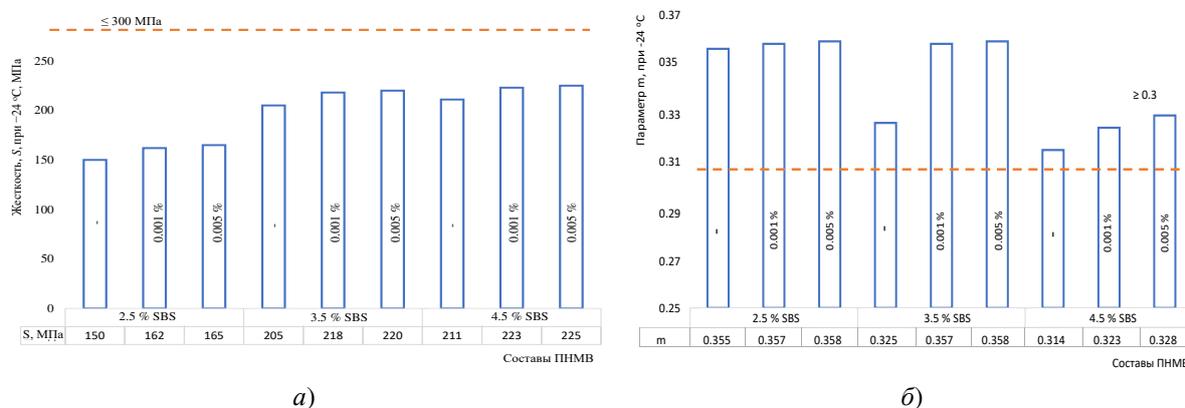


Рис. 4. Влияние одностенных углеродных нанотрубок на жесткость  $S$  (а); параметр  $m$  (ползучесть) (б) при воздействии низких температур на модифицированное вяжущее, состаренное по методу PAV  
 Fig. 4. The effect of single-walled carbon nanotubes on stiffness  $S$  (a); parameter  $m$  (creep) (b) when exposed to low temperatures on a modified binder aged by the PAV method

Из анализа рисунка 4а видно, что жесткость  $S$  незначительно увеличилась для всех наномодифицированных вяжущих. В среднем увеличение составило не более 7 %. Это позволяет заключить, что одностенные углеродные нанотрубки в исследуемом диапазоне не ухудшают низко-температурных характеристик вяжущего.

Параметр  $m$  характеризует способность вяжущего рассеивать накопленное напряжение, что, в свою очередь, харак-

теризует его способность сопротивляться растрескиванию при низких температурах. Значения  $m$  также показали незначительные изменения. Наилучшие результаты характерны для составов вяжущих № 5 и 6, в данном случае при введении ОУНТ изменения составили 1 %.

Усталостные характеристики модифицированного одностенными углеродными нанотрубками ПБВ представлены на рисунке 5.

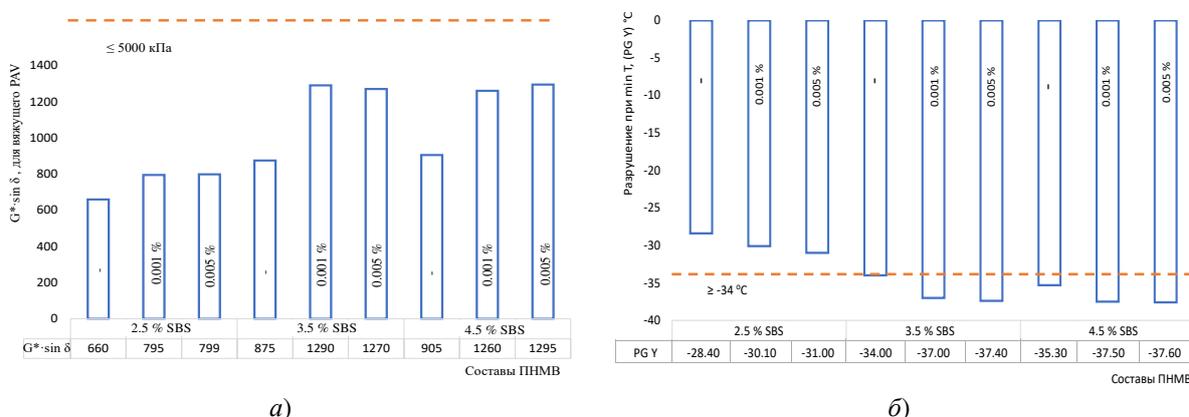


Рис. 5. Влияние одностенных углеродных нанотрубок на усталостную устойчивость (а); температуру разрушения (б) при воздействии низких температур на модифицированное вяжущее, состаренное по методу PAV

Fig. 5. The effect of single-walled carbon nanotubes on fatigue resistance (a); fracture temperature (b) when exposed to low temperatures on a modified binder aged by the PAV method

Модифицирование углеродными нанотрубками ПБВ позволяет улучшить показатель усталостной устойчивости (рис. 6а) до 47 % (состав № 5). Это свидетельствует о том, что после воздействия долгосрочного старения PAV модифицированное вяжущее способно эффективно проявлять свойства вязкоупругого материала и восстанавливаться после снятия нагрузки. Это характеризует вяжущее как систему с устойчивой к процессам долгосрочного старения полимерной сеткой, усиленной одностенными углеродными нанотрубками. Улучшились также и температурные эксплуатационные свойства модифицированных вяжущих с PG-22 до PG-34 при содержании полимера 3,5 % и ОУНТ 0,001 и

0,005 % (составы № 4, 5 и 6), что дополнительно подтверждает, что ОУНТ оказывает значительное влияние на улучшение эксплуатационных свойств при отрицательных температурах (рис. 5б).

Обобщая полученные результаты по разработке модифицированного одностенными углеродными нанотрубками ПБВ, можно заключить, что перспективными являются составы № 4 и 5.

**Исследование релаксационных процессов в наномодифицированных полимерно-битумных вяжущих.** Для изучения влияния одностенных углеродных нанотрубок на процессы эксплуатационного старения исследованы релаксационные процессы, протекающие в вяжущих.

Для этого были рассчитаны изомодульная температура  $T_{c(s)}$  и критическая температура  $T_{c(m)}$  и параметр  $\Delta T_c$ , величины которых представлены в таблице 7.

Таблица 7. Влияние одностенных углеродных нанотрубок на изомодульную и критическую температуру и параметр долговечности полимерно-битумных вяжущих

Table 7. The effect of single-walled carbon nanotubes on isomodular and critical temperature and durability parameter of polymer-bitumen binders

№ состава	Параметры оценки релаксационных процессов в вяжущих		
	$T_{c(s)}$	$T_{c(m)}$	$\Delta T_c$
1	-30,0	-28,4	-2,1
2	-32,0	-30,2	-1,8
3	-32,6	-31,0	-1,6
4	-34,5	-34,0	-0,5
5	-36,5	-37,0	0,5
6	-36,9	-37,4	0,5
7	-35,7	-35,3	-0,4
8	37,0	-37,5	0,5
9	37,1	-37,6	0,5

Параметр  $\Delta T_c$  количественно определяет потерю релаксационных свойств по мере долгосрочного старения асфальтобетонного вяжущего. Чем ниже величина  $\Delta T_c$ , тем вяжущее больше подвержено процессам старения и потере релаксации возникающих напряжений и, как следствие, растрескиванию. Модифицирование углеродными нанотрубками ПБВ позволяет улучшить параметр  $\Delta T_c$ . Максимальный эффект наблюдается у образца № 4.

Полученные данные подтверждают наше предположение о том, что одностенные углеродные нанотрубки, препятствуя коагуляции асфальтеносмолистых комплексов, способствуют замедлению эксплуатационного процесса старения полимерно-битумных вяжущих, которое основано на физических процессах, связанных с формированием надмолекулярных структур вследствие коагуляции асфальтенов.

Дальнейшее увеличение содержания СБС полимера и одностенных углеродных нанотрубок не обеспечивает дополнительного улучшения свойств. Поэтому не целесообразно проводить модифицирование указанными веществами в количествах, превышающих экспериментально установленные концентрации.

## Выводы

С помощью различных методов проведена всесторонняя оценка влияния одностенных углеродных нанотрубок на свойства полимерно-битумных вяжущих. Результаты показали следующее:

1) Введение одностенных углеродных нанотрубок в полимерно-битумное вяжущее увеличило вязкость расплава, что согласуется с представлениями об изменении вязкости дисперсно-наполненных систем с увеличением объемной концентрации дисперсной фазы. При этом вязкость модифицированного углеродными нанотрубками полимерно-битумного вяжущего соответствует требованиям спецификаций Supergravel  $\leq 3$  Па·с, а значит, не требует технологических изменений при приготовлении асфальтобетонной смеси.

2) Распределение ОУНТ в объеме ПБВ в соответствии с примененным методом оценки можно считать равномерным. Так, различия в значениях динамической вязкости образцов, взятых из верхней и нижней частей, отличаются не более чем на 1 %.

3) Результаты испытаний ПБВ, модифицированных одностенными углеродными нанотрубками, показали улучшенные характеристики образования колеи и усталости по сравнению с ПБВ при любом

количестве добавленного модификатора. Однако рекомендуемое количество составляет 0,001 % ОУНТ, 3,5 % СБС полимера и 4 % отработанного индустриального масла от массы битума для обеспечения усталостной стойкости.

4) Экспериментальные данные косвенно подтверждают гипотезу о влиянии одностенных углеродных нанотрубок на коагуляцию асфальтеносмолистых комплексов, заключающемся в замедлении коагуляции, что обеспечивает замедление

старения полимерно-битумных вяжущих в эксплуатационный период. Указанное, в частности, следует из увеличения параметра долговечности  $\Delta T_c$  на 150 %.

Требуются дополнительные исследования модифицированного одностенными углеродными нанотрубками ПБВ к растрескиванию при низких температурах в более широких температурном и временном диапазонах, а также расширение перечня битумов и видов модификаторов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Loos M. Carbon Nanotube Reinforced Composites: CNT Polymer Science and Technology. William Andrew. 2014. 304 p.
2. Chen J.-S., Wang T. J., Lee C.-T. Evaluation of a highly modified asphalt binder for field performance // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 171. P. 539-545. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.188>
3. Effect of cross-linking agents on the rheological properties of polymer-modified bitumen / M. Tirupan, S. Ryan, U. H. Bahia, S. Barmand // *Road Materials and Pavement Design*. 2015. Vol. 16(1), P. 349-361, DOI: 10.1080/14680629.2015.1029683
4. A comparative study on the performance of field-sampled asphalt mixtures for heavy-duty pavements using laboratory testing and mechanistic-empirical simulations / D. Hernando, K. Cousceir, G. Jacobs, H. Almalehy, S. R. Omranian, C. Vuye, J. Braspeninckx, W. Van den bergh // *Road Materials and Pavement Design*. 2023. Vol. 24(1). P. 554-573. <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2181011>
5. Shekhovtsova S. Yu., Korolev E. V. Formation of polymer modified binder structure in the presence of carbon nanomaterials // *Construction and Building Materials*. 2021. 303. 124591. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124591
6. Aakif I. M., Giustozzi F. Effect of polymers and micro fibres on the thermo-chemical and rheological properties of polymer modified binders // *Australian Journal of Civil Engineering*. 2023. 21:1, P. 34-49, DOI: 10.1080/14488353.2022.2067100
7. Burkov V. M., Eremin V. A. Mechanical properties of carbon-fiber-reinforced epoxy composites modified by carbon micro- and nanofillers // *Polymer composites*. 2021. Vol. 42, iss. 9. P. 4265-4276. <https://doi.org/10.1002/pc.26144>
8. Arifuzzaman M. Polymer nanocomposites for road construction: investigating the aging performance of polymer and carbon nanotube-modified asphalt binder. *Advanced Polymer Nanocomposites*. 2022, P. 319-334. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824492-0.00004-0>
9. Обухова С. Ю., Королев Е. В., Гладких В. А. Влияние углеродного наномодификатора на процессы старения полимерно-модифицированных вяжущих. Часть I: Теоретическое исследование // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии*. 2023. № 4 (28). С. 6-16.
10. Traxler R. N., Coombs C. E. The Colloidal Nature of Asphalt as Shown by its Flow Properties. *J. Phys. Chem*. 1936. Vol. 40, no. 9. P. 1133-1147. <https://doi.org/10.1021/j150378a005>
11. Gusfeldt K. H., Scott J. Factors governing Adhesion in bituminous mixes. Deutsche Shell AG, Hamburg. 1975. Vol. 1. P. 49-65; ABS. FR.; BIBL. 15
12. Печень Б. Г., Курбатов В. Л., Лосев В. П. О механизме старения битумов и методах их испытания // *Университетская наука*. 2019. № 2. С. 28-32.
13. Evaluation of the Relationship between Asphalt Binder Properties and Non-Load Related Cracking / R. M. Anderson, G. King, D. Hanson, P. Blankenship // *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*. 2011;(80):615-664.
14. Ходаков Г. С. Реология суспензий. Теория фазового течения и ее экспериментальное обоснование // *Российский химический журнал*. 2003. Т. 47, № 2. С. 33-44.
15. Naipeng T., Weidong H., Gengren H. Effect of aging on morphology, rheology, and chemical properties of highly polymer modified asphalt binder. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 281. 122595. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122595>.

Статья поступила в редакцию 02.02.2024; одобрена после рецензирования 12.04.2024; принята к публикации 31.05.2024

### Информация об авторах

*ОБУХОВА Светлана Юрьевна* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры градостроительства, Московский государственный строительный университет, г. Москва. Область научных интересов – асфальтобетон, битумопроизводные материалы, полимеры, наномодифицирование, структурообразование, термодинамика, долговечность. Автор более 140 опубликованных работ. E-mail: SHehovtsovaSYU@mgsu.ru

*КОРОЛЕВ Евгений Валерьевич* – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург. Область научных интересов – строительное материаловедение, теория структурообразования, технология новых композиционных материалов. Автор более 600 опубликованных работ. E-mail: korolev@nocnt.ru

*ГЛАДКИХ Виталий Александрович* – кандидат технических наук, директор Научно-исследовательского и испытательного центра «МГСУ СТРОЙ-ТЕСТ», Московский государственный строительный университет, г. Москва. Область научных интересов – строительные материалы, дорожное строительство, сероасфальтобетон, серосодержащие строительные материалы, серный бетон, асфальтобетон. Автор более 50 опубликованных работ. E-mail: gladkich\_87@mail.ru

**Вклад авторов:** авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 691.16

DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.18>

EDN: ZWNARG

### The effect of carbon nanomodifier on the ageing processes of polymer modified binders Part II: Practical research

*S. Iu. Obukhova*<sup>1✉</sup>, *E. V. Korolev*<sup>2</sup>, *V. A. Gladkikh*<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>National Research Moscow State University of Civil Engineering (Moscow)

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Saint Petersburg)

<sup>3</sup>Research center «MGSU Stroy-Test» (Moscow)

ShehovtsovaSYU@mgsu.ru✉

**Abstract. Introduction.** Polymer-modified binders are a common way to improve the quality of asphalt concrete and, as a result, extend the durability of highways. However, this group of materials is characterised by an important and unresolved drawback that prevents the full potential of modified binders from being realised. It is due to its ageing tendency, which inevitably causes road surfaces to deteriorate preliminarily. The use of nanomodifiers is a viable strategy to eliminate this drawback.

*The aim of the research* is to determine how single-walled carbon nanotubes affect the way that these binders form structurally during operational impacts (ageing).

*Materials and methods.* First, homogenization and dynamic viscosity were measured in order to select the optimal ratio of SBS polymer, hydrocarbon plasticizer, and single-walled carbon nanotubes for the modified binder. Next, the RTFOT method (furnace for rolling thin-film materials) and PAV (pressure vessel) were used to simulate the ageing process in a laboratory furnace. The dependences of viscoelastic characteristics on the component composition of binders

were investigated. The upper and lower limits of the operating temperature range were established. Relaxation processes in nanomodified polymer-bitumen binders have been studied.

**Research results.** It was discovered that adding single-walled carbon nanotubes to a polymer-bitumen binder increased the melt's viscosity. This is in line with the theory that systems that are filled with dispersed particles will become more viscous as the volume concentration of the dispersed phase increases. In the concentration range under study, this phenomenon can be explained by A. Einstein's rheological linear equation. The optimal content of single-walled carbon nanotubes (0.001%), SBS polymer 3.5%, and spent hydrocarbon plasticizer 4% in the binder composition has been established, which provides improved performance of the modified binder from PG (52-22) to PG grade (64-34).

**Conclusion.** It has been established that single-walled carbon nanotubes have enhanced low-temperature relaxation qualities, resistance to fatigue damage, and provided a 150% increase in the durability parameter ( $\Delta T_c$  binder).

**Keywords:** bitumen; polymer-modified binder; ageing; rheology; fatigue cracking; relaxation; durability.

**Funding:** this research received no external funding.

---

**For citation:** Obukhova S. Iu., Korolev E. V., Gladkikh V. A. The effect of carbon nanomodifier on the ageing processes of polymer modified binders. Part II: Practical research. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies.* 2024;(1):18–33. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.18>; EDN: ZWNARG

---

#### REFERENCES

1. Loos M. Carbon Nanotube Reinforced Composites: CNT Polymer Science and Technology. William Andrew, 2014. 304 p.
2. Chen J.-S., Wang T. J., Lee C.-T. Evaluation of a highly modified asphalt binder for field performance. *Construction and Building Materials.* 2018;171:539-545. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.188>
3. Tirupan M., Ryan S., Bahia U. H., Barmand S. Effect of cross-linking agents on the rheological properties of polymer-modified bitumen. *Road Materials and Pavement Design.* 2015;16(1):349-361, DOI: 10.1080/14680629.2015.1029683
4. Hernando D., Couscheir K., Jacobs G., Almalehy H., Omranian S. R., Vuye C., Braspenninckx J., Van den bergh W. A comparative study on the performance of field-sampled asphalt mixtures for heavy-duty pavements using laboratory testing and mechanistic-empirical simulations. *Road Materials and Pavement Design.* 2023;24(1):554-573. <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2181011>
5. Shekhovtsova S. Yu., Korolev E. V. Formation of polymer modified binder structure in the presence of carbon nanomaterials. *Construction and Building Materials.* 2021;303:124591. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124591
6. Aakif I. M., Giustozzi F. Effect of polymers and micro fibres on the thermo-chemical and rheological properties of polymer modified binders. *Australian Journal of Civil Engineering.* 2023;21(1):34-49. DOI: 10.1080/14488353.2022.2067100
7. Burkov V. M., Eremin V. A. Mechanical properties of carbon-fiber-reinforced epoxy composites modified by carbon micro- and nanofillers. *Polymer composites.* 2021;42(9):4265-4276. <https://doi.org/10.1002/pc.26144>
8. Arifuzzaman M. Polymer nanocomposites for road construction: investigating the aging performance of polymer and carbon nanotube-modified asphalt binder. *Advanced Polymer Nanocomposites.* 2022:319-334. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824492-0.00004-0>
9. Obukhova S. Iu., Korolev E. V., Gladkikh V. A. The effect of carbon nanomodifier on the aging processes of polymer-modified binders. Part I: Theoretical research. *Bulletin of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies.* 2023;(4):6-16. (In Russ.).
10. Traxler R. N., Coombs C. E. The Colloidal Nature of Asphalt as Shown by its Flow Properties. *J. Phys. Chem.* 1936;40(9):1133–1147. <https://doi.org/10.1021/j150378a005>
11. Gusfeldt K. H., Scott J. Factors governing Adhesion in bituminous mixes. Deutsche Shell AG, Hamburg. 1975;1:49-65; ABS. FR.; BIBL. 15
12. Pechenyj B. G., Kurbatov V. L., Losev V. P. On the mechanism of bitumen aging and methods of their testing. *University Science.* 2019;(2):28-32. (In Russ.).

13. Anderson R. M., King G., Hanson D., Blankenship P. Evaluation of the Relationship between Asphalt Binder Properties and Non-Load Related Cracking. *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists- Proceedings of the Technical Sessions*. 2011;(80):615-664.
14. Hodakov G. S. Rheology of suspensions. The theory of phase flow and its experimental substantiation. *Rossiiskij himicheskij zhurnal*. 2003;47(2):33-44. (In Russ.).
15. Naipeng T., Weidong H., Gengren H. Effect of aging on morphology, rheology, and chemical properties of highly polymer modified asphalt binder. *Construction and Building Materials*. 2021;281:122595. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122595>.

The manuscript was submitted on 02.02.2024; reviewed on 12.04.2024; adopted for publication on 31.05.2024

#### Information about the authors

*OBUKHOVA Svetlana Iurevna* – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Urban Planning, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow. Research interests – asphalt concrete, bitumen materials, polymers, nanomodification, structure formation, thermodynamics, durability. Author of more than 140 publications. E-mail: ShehovtsovaSYU@mgsu.ru

*KOROLEV Evgenii Valerevich* – Advisor of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Vice-Rector for Research, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg. Research interests – building materials science, theory of structure formation, technology of new composite materials. Author of more than 600 publications. E-mail: korolev@nocnt.ru

*GLADKIKH Vitalii Aleksandrovich* – Candidate of Engineering Sciences, Director of the Research and Testing Center «MGSU STROY-TEST», National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow. Research interests – building materials science, road construction, asphalt concrete, sulfur asphalt concrete, sulfur-containing building materials. Author of more than 50 publications. E-mail: gladkich\_87@mail.ru

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this paper.

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest.

The authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

# КОНСТРУКЦИИ

Научная статья

УДК 691.11:674.213

DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.34>

EDN: EPLUVL

## Теплотехнические свойства цокольного перекрытия деревянных домов из МХМ-панелей

*Т. А. Корнилов<sup>✉</sup>, И. А. Докторов*

Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова (г. Якутск)

[kornt@mail.ru](mailto:kornt@mail.ru)<sup>✉</sup>

**Аннотация.** *Введение.* Территория Республики Саха (Якутия) характеризуется экстремальными климатическими условиями с температурой наружного воздуха ниже  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 50-60 дней и наличием многолетнемерзлых грунтов. Для обеспечения тепловой защиты зданий с несущими стенами из МХМ-панелей здесь используется многослойная конструкция стены с теплоизоляцией из минераловатных плит и вентилируемым фасадом. При принятии конструктивных решений наружных стен и перекрытий зданий в проектах обычно руководствуются теплотехническими расчетами приведенного сопротивления теплопередаче только по глади ограждающих конструкций. Но практика эксплуатации зданий показывает, что наибольшие потери тепла происходят через узлы сопряжения цокольного перекрытия с наружными и внутренними стенами, а также через угловые соединения наружных стен.

*Цель работы* – оценка теплотехнических свойств типовых конструктивных решений узлов примыкания наружных и внутренних стен к цокольному перекрытию в применяемых типовых проектах зданий с несущими стенами из МХМ-панелей.

*Материалы и методы.* Проведен анализ типовых конструктивных решений узловых соединений в реальных проектах зданий с несущими стенами из МХМ-панелей путем выполнения теплотехнических расчетов 3D-моделей элементов конструкций с использованием программного комплекса HEAT 3D и сравнения с результатами натурного тепловизионного обследования существующих зданий из МХМ-панелей.

*Результаты.* Теплотехнический анализ показал, что наибольшее количество нарушений тепловой защиты в реальных условиях эксплуатации при температуре наружного воздуха  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже наблюдается в цокольной части домов. Значительные потери тепла через ограждающие конструкции малоэтажных домов из МХМ-панелей наблюдаются в узлах сопряжения цокольного перекрытия с наружными и внутренними стенами, а также на участках угловых соединений наружных стен. Расчеты показали, что температура на внутренней поверхности ограждающих конструкций в угловых участках сопряжения наружных стен с цокольным перекрытием значительно ниже температуры точки росы.

*Выводы.* В типовых решениях узлов сопряжения цокольного перекрытия зданий с несущими стенами из МХМ-панелей температурный режим не отвечает нормативным требованиям, что обуславливает необходимость разработки энергоэффективных узловых решений с дальнейшей актуализацией их для применения в экстремальных климатических условиях Севера России.

**Ключевые слова:** деревянные дома; здания с несущими стенами из МХМ-панелей; тепловая защита зданий; тепловизионное обследование; сопротивление теплопередаче; теплотехнический расчет; цокольное перекрытие.

**Финансирование:** работа выполнена в рамках исследований по Государственному заказу Республики Саха (Якутия) по теме «Разработка научно обоснованных решений в проектировании, строительстве и эксплуатации арктических поселений, отвечающих современным стандартам устойчивого развития и комфортности проживания. Этап 1» (ГК № 8019) в рамках комплексных научных исследований (этап 2).

**Для цитирования:** Корнилов Т. А., Докторов И. А. Теплотехнические свойства цокольного перекрытия деревянных домов из МХМ-панелей // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2024. № 1 (29). С. 34–46. DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.34>; EDN: EPLUVL

## Введение

В последние десятилетия идет постоянный поиск новых технологий и решений в деревянном домостроении: совершенствуются материалы и технологии строительства, оптимизируются технические решения различных конструктивных узлов деревянных домов [1-3]. В условиях Севера и Арктической зоны РФ одним из главных критериев при поиске оптимальных конструктивных решений в деревянном домостроении является обеспечение тепловой защиты зданий. Построенные даже по самым современным технологиям деревянные дома не всегда отвечают требованиям энергосбережения в этих суровых условиях.

Технология строительства малоэтажных зданий с несущими стенами из МХМ-панелей на российском рынке деревянного домостроения появилась относительно недавно. В настоящее время исследований различных аспектов проектирования и эксплуатации стеновых конструкций из МХМ-панелей проведено недостаточно, что сдерживает широкое внедрение данной технологии в практику строительства малоэтажных домов. Существующие на сегодня работы носят в основном обзорный характер и посвящены вопросам оценки экологических свойств, а также характеристик огнестойкости и пожароопасности стеновых конструкций из МХМ-панелей по сравнению с другими строительными материалами и технологиями.

Результаты исследования подтверждают, что благодаря многослойной структуре массивные деревянные панели МХМ в плане противопожарной безопасности имеют ряд преимуществ перед каркасно-

панельной и другими аналогичными технологиями. Так, например, данные J. Mohr [4] подтверждают безопасность такой конструкции при одностороннем воздействии огня, что соответствует воспламенению внутри или снаружи эксплуатируемого помещения. В статье [5] приведена сравнительная оценка экологичности конструкций из кирпича и МХМ-панелей по результатам исследования, авторы которого утверждают, что по всем показателям воздействия на окружающую среду и токсичности для человека стены из МХМ-панели показали более низкие выбросы в воздух по сравнению со стенами из кирпича.

С конца 2000-х годов в Республике Саха (Якутия) накапливается определенный опыт применения МХМ-панелей в деревянном домостроении. Единственный производитель таких панелей в Якутии – ООО ЛПК «АЛМАС», которое выпускает их более пятнадцати лет, ведет поиск наиболее оптимальных конструктивных решений домов из МХМ-панелей, тесно работая с проектными организациями. За последние годы реализован и готов к реализации ряд проектов домов из МХМ-панелей, в том числе для строительства в северных и арктических районах Якутии. При проектировании и сборке стеновых МХМ-панелей в ООО «АЛМАС» в 2018 году впервые разработаны ТУ 16.23.20-001-25158601-2018 [6].

На базе Северо-Восточного федерального университета в разное время проводились единичные исследования фрагментов МХМ-панелей, выпускаемых ООО ЛПСК «АЛМАС», для оценки их теплотехнических свойств и прочностных характеристик.

Для сравнения расчетных и экспериментальных значений приведенного сопротивления теплопередаче стеновых конструкций из МХМ-панелей были проведены испытания фрагментов стен из МХМ-панелей в экспериментальной климатической камере. Теплотехнические характеристики стеновых ограждений на основе МХМ-панелей толщиной 220 мм с утеплением из минераловатных плит различной толщиной теплоизолирующего слоя определялись с учетом реальных условий эксплуатации в условиях г. Якутска [7].

Исследования показали возможность применения МХМ-панелей в ограждающих конструкциях малоэтажных зданий в климатических условиях Севера при использовании эффективных утеплителей из минераловатных плит толщиной не менее 100 мм. Результаты исследований фрагмента МХМ-панели на прочность и деформатичность выявили соответствие их прочностных характеристик требованиям технических условий [6]. По результатам испытаний коэффициент безопасности (запаса прочности)  $K_b$  составил 3,6 при нормируемом значении не менее 1,87 [8].

В зданиях с несущими стенами из МХМ-панелей, строящихся на территории Республики Саха (Якутия), для обеспечения тепловой защиты используется многослойная конструкция стены с теплоизоляцией из минераловатных плит и вентилируемым фасадом. В типовом решении таких домов в качестве основных конструктивных элементов наружных стен в проектах приняты в большинстве случаев МХМ-панели толщиной 180 мм, что находится в пределах рекомендуемых значений в соответствии с [6]. В качестве утеплителя используются минераловатные плиты из каменного волокна толщиной 100, 150 или 200 мм.

Отсутствие нормативных документов по проектированию зданий с несущими стенами из МХМ-панелей сдерживает широкое их применение в строительстве малоэтажных зданий. Это, в свою очередь, требует комплексного исследования характеристик и свойств материалов, ме-

тодов проектирования и разработки энергоэффективных узловых решений с дальнейшей актуализацией их для применения в климатических условиях Севера России.

**Целью** данной работы является оценка теплотехнических свойств типовых конструктивных решений узлов примыкания наружных и внутренних стен из МХМ-панелей к цокольному перекрытию.

Для достижения заданной цели осуществлен анализ типовых конструктивных решений узловых соединений, примененных в реальных проектах зданий с несущими стенами из МХМ-панелей, с помощью проведения теплотехнических расчетов 3D-моделей элементов конструкций и сравнения с результатами натурного тепловизионного обследования существующих зданий из МХМ-панелей.

#### **Материалы и методы исследования**

За последние годы реализован и готов к реализации ряд проектов домов из МХМ-панелей, в том числе для строительства в северных и арктических районах Якутии. В таблице 1 приведены характеристики принятых конструктивных решений наружных стен в некоторых проектах зданий с несущими стенами из МХМ-панелей, предназначенных для строительства в населенных пунктах Якутии с различными климатическими условиями в соответствии с СП 131.13330.2020 [9].

Для оценки реального состояния конструкций и микроклимата в жилых домах, построенных из МХМ-панелей по типовому проекту, в с. Бясь-Кюель Горного района Республики Саха (Якутия) в рамках программы восстановления жилья жителям, пострадавшим от природного пожара в 2021 году, были проведены тепловизионные обследования в зимний период эксплуатации в 2022 и 2023 годах.

В дни проведения тепловизионных обследований температура наружного воздуха составляла  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$  в январе 2022 года,  $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$  в январе 2023 года.

Обследованию были подвергнуты восемь домов из МХМ-панелей, построенных по типовым проектам: проект двухэтажного дома площадью  $140\text{ м}^2$  и

проекты одноэтажных домов площадью 50, 60 и 100 м<sup>2</sup>. Во всех рассматриваемых проектах зданий приняты единые кон-

структивные решения по наружным и внутренним стенам, узлам их примыкания к перекрытиям.

Таблица 1. Принятые конструктивные решения наружных стен в проектах домов с несущими стенами из МХМ-панелей в Республике Саха (Якутия)

Table 1. The adopted design solutions for exterior walls in projects of houses with load-bearing walls made of MHM panels in the Republic of Sakha (Yakutia)

Наименование проекта	Населенный пункт	ГСОП, °С·сут	Состав наружной стены
Типовой проект индивидуально-жилого дома на 60 м <sup>2</sup>	с. Бясь-Кюель	10677	- МХМ-панели, $\delta = 180$ мм; - базальтовый утеплитель ПП-80, $\gamma = 80$ кг/м <sup>3</sup> , $\delta = 100$ мм
Типовой проект одноэтажного индивидуально-жилого дома	г. Якутск	10483	- МХМ-панели, $\delta = 180$ мм; - базальтовый утеплитель ПЖ-100, $\gamma = 100$ кг/м <sup>3</sup> , $\delta = 100$ мм
Проект 12-квартирного жилого дома	с. Багагай-Альта	12302	- МХМ-панели, $\delta = 180$ мм; - утеплитель базальт Л-75, $\delta = 200$ мм
Проект 16-квартирного жилого дома	с. Хонуу	12238	- МХМ-панели, $\delta = 180$ мм; - утеплитель минплита ПЖ-120 (НГ), $\gamma = 120$ кг/м <sup>3</sup> , $\delta = 100$ мм в два слоя
Проект 12-квартирного жилого дома	с. Саскылах	12280	- МХМ-панели, $\delta = 180$ мм; - базальтовый утеплитель ПП-100, $\gamma = 100$ кг/м <sup>3</sup> , $\delta = 100$ мм

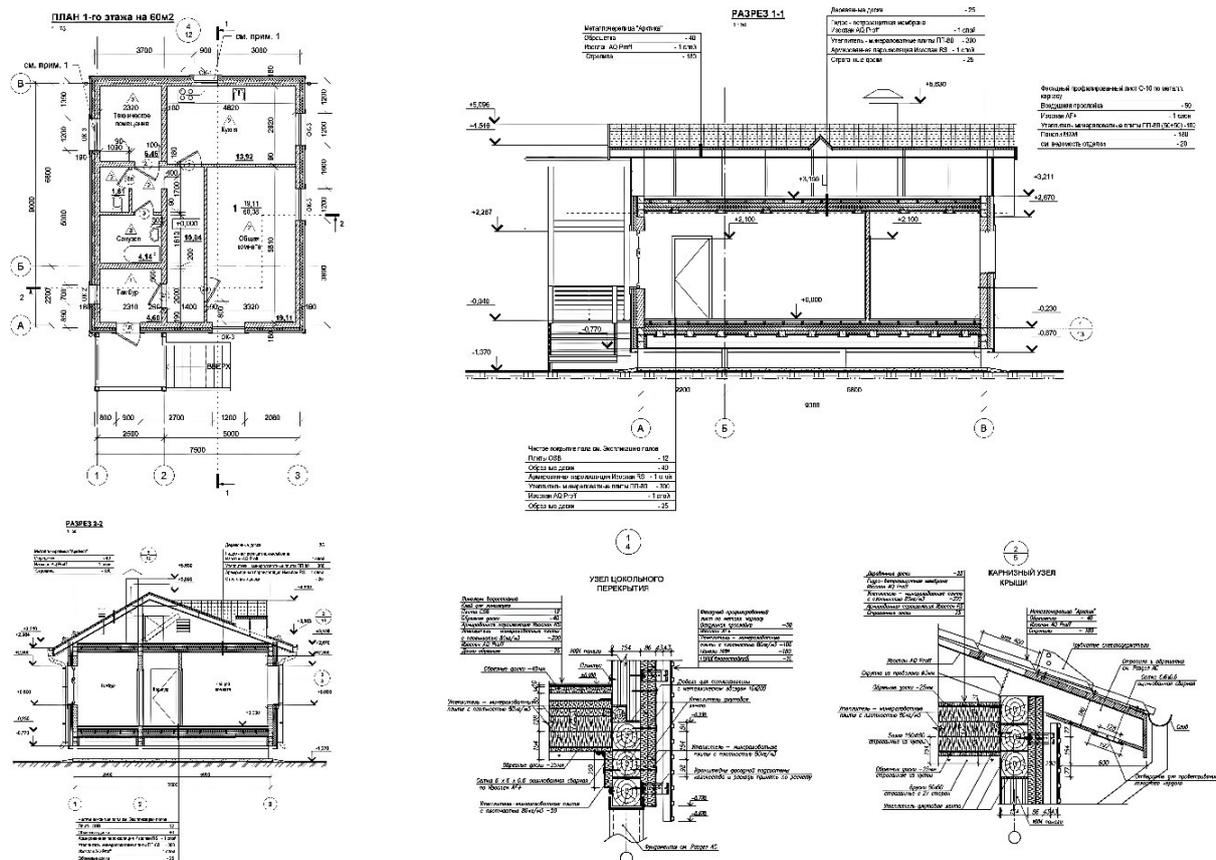


Рис. 1. План и разрезы дома из МХМ-панелей на 60 м<sup>2</sup>  
Fig. 1. Plan and sections of a house made of 60 m<sup>2</sup> MHM panels

В качестве примера можно рассмотреть принятые конструктивные решения в проекте одноэтажного дома площадью 60 м<sup>2</sup>. Конструктивная схема здания – несущие продольные и поперечные стены из МХМ-панелей, жестко связанные обвязкой и балками покрытия. Фундаменты – стальные сваи диаметром 219 мм, устанавливаемые в предварительно пробуренные скважины. Окладные венцы – в три ряда из брусев хвойных пород влажностью не более 20 %. Стены наружные – МХМ-панели толщиной 180 мм, утепленные минераловатными плитами ПП80 плотностью 80 кг/м<sup>3</sup> по ГОСТ 9573-2021 толщиной 100 мм. Цокольное перекрытие – дощатый настил по балкам из бруса 180×180 мм. В цокольном перекрытии и покрытии теплоизоляция выполнена минераловатными плитами ПП80 плотностью 80 кг/м<sup>3</sup> по ГОСТ 9573-2021 толщиной 300 мм (рис. 1).

#### Результаты тепловизионных обследований домов

Проведенные обследования домов из МХМ-панелей в с. Бясь-Кюель показали, что температура внутреннего воздуха в домах не соответствует требованиям СанПиН 2.1.2.2645-10 [10], например, при температуре наружного воздуха -52 °С

воздух внутри помещений зданий в среднем имел температуру +16,5 °С.

По результатам анализа полученных термограмм можно заключить, что во всех домах наблюдается неравномерное распределение температуры на участках соединения стен с цокольным перекрытием и значительные потери тепла происходят через узлы сопряжения цокольного перекрытия с наружным и внутренним стенами, а также через угловые соединения наружных стен, расположенных взаимно перпендикулярно.

В большинстве домов температура на внутренней поверхности углового соединения наружной стены с цокольным перекрытием ниже, чем температура точки росы. В угловых участках пола некоторых домов установлена даже минусовая температура на внутренней поверхности.

Термограмма на поверхности стены внутри помещения кухни двухэтажного здания (рис. 2) показывает, что имеется неравномерное распределение температур на поверхности стены со значительным перепадом. При этом средняя температура на поверхности стены составляет 9,6 °С, что не соответствует требованиям действующих норм СП 50.13330.2012 [11] по перепаду температуры.

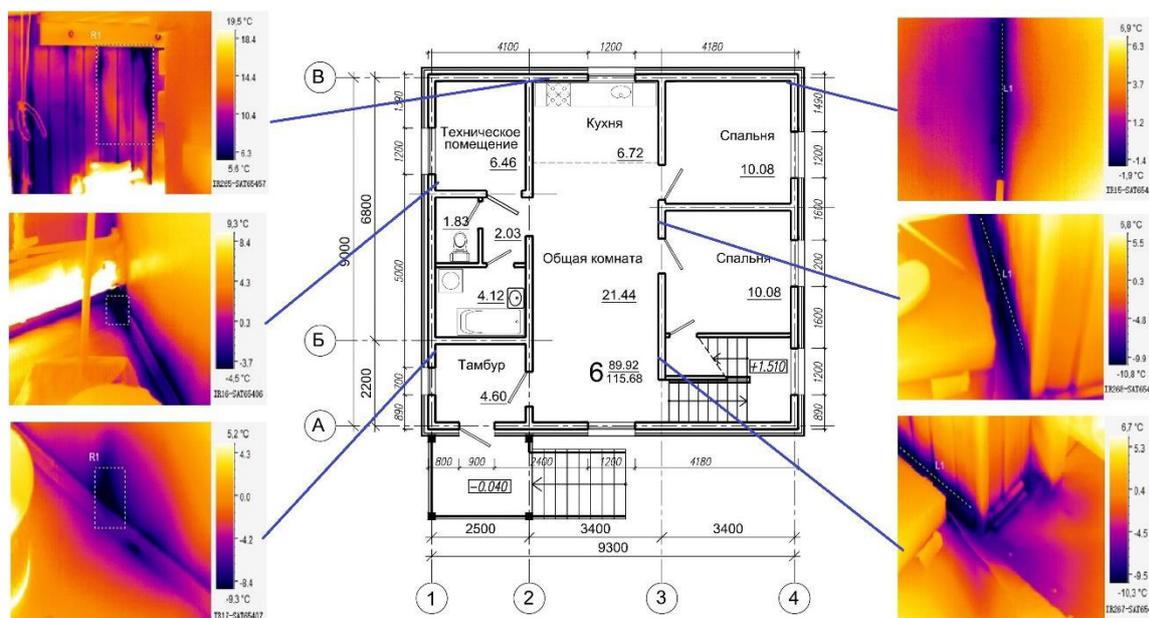


Рис. 2. Термограммы на внутренней поверхности ограждающих конструкций двухэтажного индивидуального жилого дома площадью 140 м<sup>2</sup>

Fig. 2. Thermograms on the inner surface of the enclosing structures of a two-storey individual residential building with an area of 140 m<sup>2</sup>

Минимальная температура на внутренней поверхности наружных стен  $-5,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что значительно ниже точки росы. Это в некоторой степени можно объяснить спецификой технологии изготовления МХМ-панелей, которые являются материалом, имеющим неоднородную структуру в разных направлениях. При этом низкое качество обработки и сушки пиломатериалов может привести к образованию щелей в местах их соединения по ширине.

На участках сопряжения наружных и внутренних стен с цокольным перекрытием двухэтажного дома (рис. 2) распределение температуры также неравномерное. Средние значения температур на этих участках отрицательные и изменяются в диапазоне от  $-5,1$  до  $-13,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что значительно ниже температуры точки росы. В узлах угловых соединений наружных

стен также наблюдается неравномерность распределения температуры на поверхностях, где минимальная температура на стыках достигает значений до  $-11,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Термограммы в узле углового соединения наружных стен и цокольного перекрытия в одноэтажных зданиях (рис. 3) показывают, что значения средней температуры в данном узле составляют  $2,5...3,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , минимальная температура достигает до  $-2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Значения минимальных температур на участке сопряжения наружных стен с цокольным перекрытием во всех обследованных одноэтажных зданиях находятся в диапазоне от  $8,0$  до  $11,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что не представляет существенной разницы. Это говорит о том, что в узлах примыкания наружной стены с цокольным перекрытием в этих домах приняты одинаковые конструктивные решения и качество монтажа узла примерно одинаково.

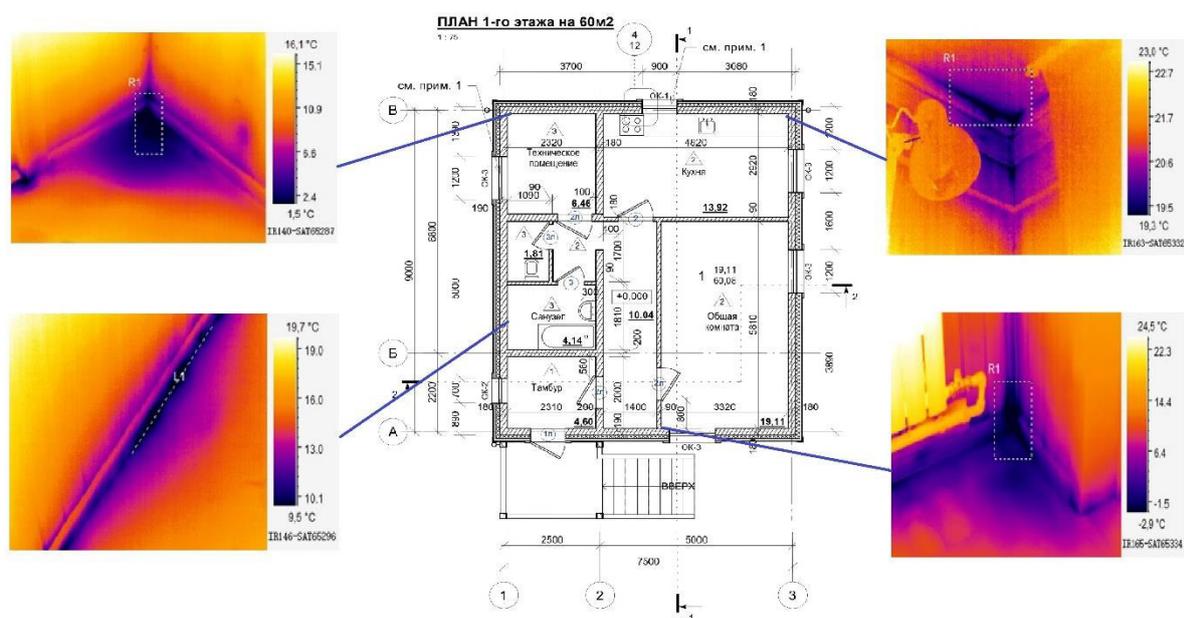


Рис. 3. Термограммы на внутренней поверхности ограждающих конструкций одноэтажного индивидуального жилого дома площадью  $60\text{ м}^2$

Fig. 3. Thermograms on the inner surface of the enclosing structures of a single-storey individual residential building with an area of  $60\text{ м}^2$

В узлах угловых соединений стен с перекрытием средняя температура на поверхностях составляет  $18,1...21,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что соответствует требованиям [11]. Значительные теплопотери в рассматриваемых домах наблюдаются на участке сопряжения

внутренней стены с цокольным перекрытием, где минимальная температура достигает  $-6,7...-6,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, наиболее проблемными участками, где имеют место значительные потери тепла через ограждающие

конструкции при эксплуатации домов из МХМ-панелей, являются узлы сопряжения цокольного перекрытия с наружными и внутренними стенами, а также угловые соединения наружных стен. Температурный режим внутри помещений деревянных домов не отвечает нормативным требованиям, и минимальная температура на внутренней поверхности ограждающих конструкций ниже температуры точки росы. Наличие небольших дефектов в узловых соединениях конструкций при высокой инфильтрации воздуха в зимний период приводит к интенсивному проникновению холодного воздуха.

#### Результаты теплотехнического анализа конструкций

В домах с несущими стенами из МХМ-панелей применяют два типа конструктивных решений по устройству цокольного перекрытия: по деревянным балкам и панельное.

*Первый вариант* устройства цокольного перекрытия является традиционным и широко применяется в малоэтажном строительстве для различных вариантов объемно-планировочных и конструктивных решений домов. Один слой утеплителя укладывается между брусками обвязки, дополнительный слой (слои) – между дос-

ками каркаса, связанными с шагом 590 мм для плотного прилегания. Сечение досок каркаса подбирается с учетом толщины утеплителя. В проектах часто принимают сечение балок из брусков 180×180 мм.

*Второй вариант* устройства цоколя для домов из МХМ-панелей связан с использованием самих панелей в качестве перекрытия вместо деревянных балок. Утепление при этом осуществляется за счет укладки минераловатных теплоизоляционных плит в один или два слоя между деревянными балками меньшего размера (100×150 или 100×100 мм) с дополнительным утеплением по каркасу из досок сечением 40×150 мм.

Для анализа эффективности типовых конструктивных решений по устройству цокольного перекрытия домов с несущими стенами из МХМ-панелей были проведены теплотехнические расчеты 3D-моделей узлов соединений ограждающих конструкций с использованием сертифицированного программного комплекса HEAT 3D. Расчетные характеристики используемых материалов приняты по [11] для условий эксплуатации А с учетом низкой влажности воздуха в арктических районах и представлены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики материалов, используемых в типовых решениях наружной стены и цокольного перекрытия в домах с несущими стенами из МХМ-панелей

Table 2. Characteristics of materials used in standard solutions of the exterior wall and basement in houses with load-bearing walls made of MHM panels

Материал	Плотность, $\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	Расчетные характеристики	
		теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·°С)	паропроницаемость $\mu$ , мг/(м·ч·Па)
МХМ-панель	500-600	0,13	0,03
Пиломатериалы из хвойных пород поперек волокон	520-550	0,12	0,06
Плиты минераловатные из каменного волокна	40-60	0,04	0,32
	80-125	0,04	0,35
Ориентированные стружечные плиты (ОСП)	600-700	0,13	0,004
Гипсоволокнистые плиты	1250	0,34	0,075

Предварительные теплотехнические расчеты (табл. 3) показали, что при первом типовом решении (с балками перекрытия) наименьшая толщина теплоизоляционного слоя (слоев), отвечающая

нормативным требованиям, получается равной 350 мм при  $R_0 = 8,55 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$ , что отвечает нормативным требованиям для всех климатических районов Якутии, в том числе северных и арктических.

Таблица 3. Теплотехнические характеристики конструктивных решений цокольного перекрытия домов с несущими стенами из МХМ-панелей

Table 3. Thermal engineering characteristics of structural solutions for basement floors of houses with load-bearing walls made of MHM panels

№	Толщина теплоизоляции $d_2$ , мм	Температура наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92	Min температура на внутренней поверхности, $t_{min}$ , °C	Приведенное сопротивление теплопередачи $R_0$ , $m^2 \cdot °C / Вт$	Удельные потери теплоты $\Psi$ , $Вт / (m^2 \cdot °C)$
<i>Типовое решение 1 (с балками перекрытия)</i>					
1	300	-50	19,6	7,54	0,132
2		-58	19,4		
3	350	-50	19,6	8,55	0,117
4		-58	19,5		
<i>Типовое решение 2 (с панелью перекрытия)</i>					
1	300	-50	19,6	6,46	0,154
2		-58	19,6		
3	350	-50	19,7	7,76	0,129
4		-58	19,6		
5	400	-50	19,7	9,3	0,107
6		-58	19,8		

В случае применения второго типа конструктивного решения с теплоизоляцией толщиной 350 мм можно обеспечить сопротивление теплопередаче  $R_0 = 7,76 m^2 \cdot °C / Вт$ , что является недостаточным для арктических районов Якутии, для которых в соответствии с СП

50.13330.2012 [11]  $R_0$  составляет не менее  $8,49 m^2 \cdot °C / Вт$ . Такое требуемое значение сопротивления теплопередаче можно обеспечить только при применении утеплителя толщиной не менее 400 мм. Второй из типовых вариантов конструкций цокольного перекрытия в реальных про-

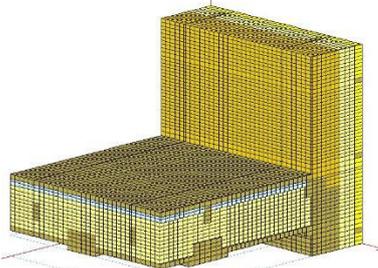
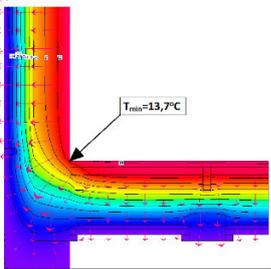
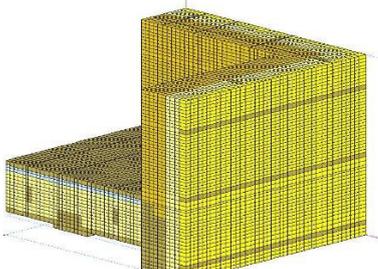
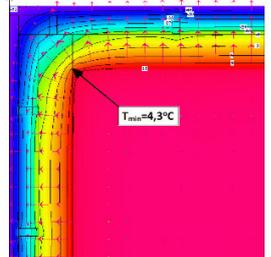
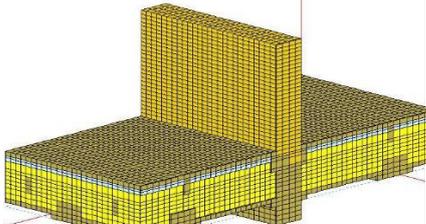
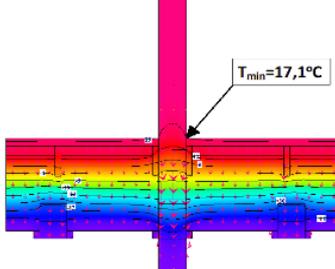
ектах применяется достаточно редко. Это в первую очередь связано с удорожанием стоимости проекта по причине увеличения расхода пиломатериалов для производства массивных деревянных панелей. Кроме того, большая толщина слоя теплоизоляции (не менее 400 мм) увеличивает затраты на теплоизоляционные материалы.

В типовых конструктивных решениях цокольного перекрытия по глади внутренней поверхности расчетные значения минимальной температуры не ниже  $19,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что обеспечивает разницу между температурой внутреннего воздуха и температурой на внутренней поверхности в пределах нормируемых значений не более  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  по СП 50.1333.2012 [11].

Однако результаты теплотехнических расчетов 3D-моделей угловых участков сопряжения стен и цокольного перекрытия типового решения показали, что температура на внутренней поверхности рассматриваемого участка не только не отвечает вышеуказанным требованиям, но и значительно ниже температуры точки росы.

Для анализа типовых решений цокольного перекрытия были проведены теплотехнические расчеты 3D-моделей узловых соединений рядовых участков сопряжения наружной и внутренней стен с цокольным перекрытием и углового участка сопряжения наружных стен с цокольным перекрытием (табл. 4).

Таблица 4. Результаты теплотехнического расчета цокольного перекрытия  
Table 4. The results of the thermal calculation of the basement floor

Вид узлового соединения	Расчетная модель конструкции в ПК HEAD 3D	Температурные поля в разрезах узлов конструкций
Рядовой участок сопряжения наружной стены и цокольного перекрытия		В вертикальном разрезе узла  $T_{\min}=13,7^{\circ}\text{C}$
Угловой участок сопряжения наружных стен и цокольного перекрытия		В горизонтальном разрезе на уровне пола  $T_{\min}=4,3^{\circ}\text{C}$
Рядовой участок сопряжения внутренней стены и цокольного перекрытия		В вертикальном разрезе узла  $T_{\min}=17,1^{\circ}\text{C}$

В расчетной модели были приняты значения толщины теплоизоляционных слоев, наиболее часто используемые в типовых проектах деревянных домов из МХМ-панелей для строительства в северных и арктических районах: для стен – 150 мм, цокольного перекрытия – 350 мм.

Результаты расчетов показали, что на угловом участке сопряжения наружных стен и цокольного перекрытия минимальная температура на внутренней поверхности участка значительно ниже температуры точки росы и составляет  $t_{\min} = +4,3$  °С. В качестве основной причины возникновения такой ситуации можно рассматривать наличие теплопроводных элементов в виде деревянных балок из брусьев сечением 180×180 мм, которые опираются на свайные фундаменты, что значительно увеличивает тепловые потери через цокольное перекрытие.

### Выводы

Анализ результатов проведенных тепловизионных обследований деревянных малоэтажных деревянных домов с несущими стенами из МХМ-панелей на свайных фундаментах на территории Якутии и теплотехнический анализ ограждающих конструкций позволил констатировать следующее:

1. Наибольшее количество нарушений тепловой защиты в реальных условиях эксплуатации при температуре наружного воздуха  $-45$  °С и ниже наблюдается в цокольной части домов. Самыми слабыми участками, где имеют место значительные потери тепла через ограждающие конструкции малоэтажных домов из МХМ-панелей, являются узлы сопряжения цокольного перекрытия с наружными и внутренними стенами, а также угловые соединения наружных стен, расположен-

ных взаимно перпендикулярно. При этом тепловизионные обследования показали, что в ряде обследованных домов минимальные значения температуры на внутренней поверхности наблюдаются на участках сопряжения внутренней стены с цокольным перекрытием и достигают до  $-6,7...-6,9$  °С, что может быть связано как с недостаточной проработкой конструкции данного узла, так и некачественным исполнением строительно-монтажных работ. Наличие небольших дефектов в узловых соединениях конструкций при высокой инфильтрации воздуха в зимний период приводит к интенсивному проникновению холодного воздуха.

2. Согласно результатам теплотехнических расчетов, типовые решения цокольного перекрытия с балками перекрытия и панелью перекрытия в целом при соответствующей толщине теплоизоляции отвечают требованиям действующих норм по температурному режиму для эксплуатации домов в климатических условиях северных и арктических районов. Вместе с тем теплотехнические расчеты 3D-моделей угловых участков сопряжения наружных стен с цокольным перекрытием подтверждают результаты тепловизионных обследований и показали, что температура на внутренней поверхности рассматриваемого участка значительно ниже температуры точки росы.

3. Таким образом, в типовых решениях узлов сопряжения цокольного перекрытия зданий с несущими стенами из МХМ-панелей температурный режим не отвечает нормативным требованиям, что обуславливает необходимость разработки энергоэффективных узловых решений с дальнейшей актуализацией их для применения в экстремальных климатических условиях Севера России.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воякин А. Многослойные панели из древесины – деревянная альтернатива бетону // Лесная индустрия: деловой журнал. URL: <https://www.forumhouse.ru/entries/13247/> (дата обращения 28.10.2022).

2. Леонович О. К., Короб А. Ю. Перспективные направления в строительстве деревянных малоэтажных зданий // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2022. № 1 (252). С. 188–198.

3. Сравнительный анализ технологий деревянного строительства / В. И. Жаданов, К. В. Юкова, Е. В. Марсакова, И. С. Инжутов, В. Г. Котлов // Материалы Всероссийской научно-методической конференции «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры». Оренбург, 2018. С. 159-166.
4. Mohr J. Brand und Schallschutz bei MHM-Elementen REI 90 und 78 dB Holzbauweise // Holzbau die neu Quadriga. 2012. No. 3. P. 53
5. Silvia Santi, Francesca Pierobon, Giulia Corradini. Massive wood material for sustainable building design: the Massiv-Holz-Mauer wall system // Journal of Wood Science. 2016. Vol. 62. Pp. 416-428. DOI 10.1007/s10086-016-1570-7
6. ТУ 16.23.20-001-25158601-2018. Панель массивная деревянная стеновая и деревянные конструкции из хвойных пород древесины / ООО ЛПК «АЛМАС». Якутск, 2018.
7. Чахов Д. К., Докторов И. А., Лавров М. Ф. Теплозащитные свойства деревянных стеновых панелей «Massiv-Holz-Mauer» для условий Якутии // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 1. С. 35-38.
8. Испытания фрагмента МХМ-панели / П. Г. Романов, Д. К. Чахов, И. А. Докторов, И. А. Никитин, В. А. Степанов, М. Г. Шамаев // Universum: технические науки: электрон. науч. журн. 2022. № 12(105). URL: <https://universum.com/ru/tech/archive/item/14730>.
9. СП 131.13330.2020. СНиП 23-01-99\* Строительная климатология.
10. СанПиН 2.1.2.2645-10. Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях.
11. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 (с изменениями № 1 от 14.12.2018 и изменениями № 2 от 15.12.2021).

Статья поступила в редакцию 08.05.2024; одобрена после рецензирования 30.05.2024; принята к публикации 03.06.2024

### Информация об авторах

*КОРНИЛОВ Терентий Афанасьевич* – доктор технических наук, действительный член Академии наук Республики Саха (Якутия), профессор кафедры «Проектирование, строительство и технологии», Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, г. Якутск. Область научных интересов – тепловая защита зданий в холодных районах с экстремально низкой температурой воздуха. Автор более 120 научных работ. E-mail: kornt@mail.ru.

*ДОКТОРОВ Иван Алексеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование, строительство и технологии», Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, г. Якутск. Область научных интересов – технология деревообработки и деревянное домостроение в условиях Севера. Автор более 60 научных работ. E-mail: dial73@mail.ru.

**Вклад авторов:** авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

---

Scientific article

UDC 691.11:674.213

DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.34>

EDN: EPLUVL

### Thermal properties of the basement floor in wooden houses made from MHM-panels

*T. A. Kornilov<sup>✉</sup>, I. A. Doctorov*

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University (Yakutsk)

kornt@mail.ru<sup>✉</sup>

**Abstract. Introduction.** The territory of the Republic of Sakha (Yakutia) is characterised by extreme climatic conditions with outdoor temperatures below -40 °C lasting 50-60 days and the

presence of permafrost soils. In these conditions, a multilayer wall structure with thermal insulation constructed from mineral wool slabs and a vented facade are used to provide thermal protection for buildings with load-bearing walls built from MHM-panels. The surface of the enclosing buildings is typically the only factor taken into consideration by thermal engineers when making design decisions for exterior walls, basements, attics, and floor-to-floor ceilings in projects. However, the practice of building operation shows that the greatest heat losses occur through the junctions of the basement floor with the outer and inner walls, as well as through the corner joints of the outer walls.

*The aim of the research* is to evaluate the thermal engineering properties of typical structural solutions for the junction of external and internal walls to the basement floor in the standard projects of houses with load-bearing walls made from MHM-panels.

*Materials and methods.* In order to achieve this goal, an analysis of typical structural solutions of nodal joints used in real projects of buildings with load-bearing walls made of MHM-panels was carried out by conducting thermal engineering calculations of 3D models of structural elements using the certified HEAT 3D software package and comparing with the results of a full-scale thermal imaging survey of existing buildings made of MHM-panels.

*Research results.* The thermal analysis showed that the greatest number of violations of thermal protection in real operating conditions at an outdoor temperature of 45 °C and below is observed in house basements. Significant heat losses through the enclosing structures of low-rise buildings made of MHM-panels are observed at the junctions of the basement floor with external and internal walls, as well as at the sites of angular joints of external walls. Calculations have shown that the temperature on the inner surface of the enclosing structures in the corner sections of the interface of the outer walls with the basement floor is significantly lower than the dew point temperature.

*Conclusion.* Conventional methods for connecting nodes in basement floors of buildings with load-bearing walls made from MHM panels do not account for temperature variations. As a result, energy-efficient node solutions must be developed and updated in order to be used in the harsh climate of northern Russia.

**Keywords:** wooden houses; buildings with load-bearing walls made from MHM-panels; thermal protection of buildings; thermal imaging inspection; heat transfer resistance; thermal engineering calculation; basement floor.

**Funding:** this research was supported by the State of the Republic of Sakha (Yakutia) in the framework of comprehensive research on "The development of scientifically based solutions in the design, construction and operation of Arctic settlements that meet modern standards of sustainable development and living comfort. Stage 1" (GC No. 8019) (stage 2).

---

**For citation:** Kornilov T. A., Doctorov I. A. Thermal properties of the basement floor in wooden houses made from MHM-panels. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies.* 2024;(1):34–46. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.34>; EDN: EPLUVL

---

## REFERENCES

1. Vojakin A. Multilayer panels made of wood – a wooden alternative to concrete. *Delovoj zhurnal «Lesnaja industrija»*. Available from: <https://www.forumhouse.ru/entries/13247/> [Accessed 28 October 2022]. (In Russ.).
2. Leonovich O. K., Korob A. Ju. Promising directions in the construction of wooden low-rise buildings. *Works of BGTU. Ser. 1: Forestry, nature management and processing of renewable resources.* 2022;(1):188–198. (In Russ.).
3. Jukova K. V., Marsakova E. V., Inzhutov I. S., Kotlov V. G., Zhadanov V. I. Comparative analysis of technologies of wooden construction. *Proceedings of the All-Russian scientific and methodological conference "University complex as a regional center of education, science and culture"*. Orenburg; 2018:159-166.
4. Mohr J. Brand und Schallschutz bei MHM-Elementen REI 90 und 78 dB Holzbauweise. *Holzbau die neu Quadriga.* 2012;(3):53.

5. Silvia Santi, Francesca Pierobon, Giulia Corradini. Massive wood material for sustainable building design: the Massiv-Holz-Mauer wall system. *Journal of Wood Science*. 2016;62:416–428. DOI: 10.1007/s10086-016-1570-7

6. TU 16.23.20-001-25158601-2018. The panel is a massive wooden wall and wooden structures made of coniferous wood. ООО LPK “ALMAS”. Yakutsk; 2018. (In Russ.).

7. Chahov D. K., Doktorov I. A., Lavrov M. F. Heat-protective properties of wooden wall panels "Massiv-Holz-Mauer" for the conditions of Yakutia. *Industrial and Civil Engineering*. 2012;(1):35-38. (In Russ.).

8. Romanov P. G. et al. Tests of the fragment of the MHM panel. *Universum: tehnicheckie nauki: jelektron. nauchn. zhurn.* 2022;(12). Available from: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/14730>. (In Russ.).

9. SP 131.13330.2020. SNiP 23-01-99\* Construction climatology. (In Russ.).

10. SanPiN 2.1.2.2645-10. Sanitary and epidemiological requirements for living conditions in residential buildings and premises. (In Russ.).

11. SP 50.13330.2012. Thermal protection of buildings. Updated version of SNiP 23-02-2003 (with amendments No. 1 dated 12/14/2018 and amendments No. 2 dated 12/15/2021). (In Russ.).

The manuscript was submitted on 08.05.2024; reviewed on 30.05.2024; adopted for publication on 03.06.2024

### Information about the authors

*KORNILOV Terentii Afanasevich* – Doctor of Engineering Sciences, Member of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Professor of the Department of Design, Construction and Technology, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk. Research interests – thermal protection of buildings in cold areas with extremely low air temperatures. Author of more than 120 publications. E-mail: kornt@mail.ru.

*DOKTOROV Ivan Alekseevich* – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Design, Construction and Technology, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk. Research interests – wood processing technology and wooden house construction in the North. Author of more than 60 publications. E-mail: dial73@mail.ru.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this paper.

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest.

The authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

Научная статья

УДК 69.07

DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.47>

EDN: HMOUEX

## Оценка напряженно-деформированного состояния конструкций здания натурными испытаниями в период эксплуатации

*В. И. Римшин<sup>1,2</sup>, П. С. Трунгов<sup>1</sup>, В. В. Кислова<sup>1</sup>, Е. В. Кислова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (г. Москва)

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (г. Москва)

[v.rimshin@niisf.ru](mailto:v.rimshin@niisf.ru)

**Аннотация.** *Введение.* При проведении технического обследования зданий методика проведения поверочного расчета конструкций, позволяющая смоделировать расчетную схему и проанализировать напряженно-деформированное состояние с целью определения опасных участков и возможности образования силовых трещин, используется давно и доказала свою эффективность. Однако иногда поверочного расчета может быть недостаточно. В статье приведены результаты оценки напряженно-деформированного состояния путем проведения натурального испытания статическим нагружением плиты перекрытия реконструируемого здания с учетом трещин. Испытание проведено в условиях действующего строительства. В настоящее время нормативных документов, регламентирующих проведение натуральных испытаний железобетона в эксплуатационном периоде, нет. Но имеются такие нормы для испытания сборных железобетонных изделий в заводских условиях и на испытательных стендах в лабораториях. Для проведения подобных испытаний эксплуатируемых конструкций в каждом конкретном случае необходимо разрабатывать программу работ, являющуюся своего рода исследованием для обоснования корректности и правдоподобности результатов испытания.

*Цель исследования* – определить напряженно-деформированное состояние плиты перекрытия с учетом трещин, выявленных в ходе технического обследования, путем натуральных испытаний статическим нагружением, а также оценить эффективность применения данной методики.

*Методы.* Настоящее исследование содержит методику и основания для проведения натурального испытания плиты перекрытия. Описаны программа работ, применяемые измерительные приборы и оборудование. Проведен поверочный расчет плиты для получения прогнозируемых результатов испытания. Показаны схема нагружения и материалы, используемые для создания фактической контрольной нагрузки на участке испытания.

*Результаты испытания.* Приведены качественные и количественные показатели изменения напряженно-деформированного состояния плиты перекрытия в процессе статического нагружения. Сделан вывод о техническом состоянии конструкции в соответствии с действующими нормами. Полученные результаты позволили сделать вывод об эффективности применения описанной методики.

*Заключение.* Обоснован вывод об эффективности применения методики проведения натуральных испытаний строительных конструкций с целью определения напряженно-деформированного состояния.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние; трещиностойкость; жесткость; натурные испытания; статическое нагружение; прогиб; ширина раскрытия трещин; прогибомер.

**Финансирование:** авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

---

**Для цитирования:** Оценка напряженно-деформированного состояния конструкций здания натурными испытаниями в период эксплуатации / В. И. Римшин, П. С. Трунгов, В. В. Кислова, Е. В. Кислова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2024. № 1 (29). С. 47–57. DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.47>; EDN: HMOUEX

---

© Римшин В. И., Трунгов П. С., Кислова В. В., Кислова Е. В., 2024.

## **Введение**

Техническое обследование – неотъемлемая часть жизненного цикла зданий и сооружений, проводится как во время строительства, так и в период эксплуатации здания. Основная цель проведения обследования – определение текущего технического состояния строительных конструкций и здания в целом, что, в свою очередь, позволяет сделать вывод о возможности или невозможности его дальнейшей нормальной эксплуатации.

Самым явным и часто встречающимся дефектом при визуальном обследовании железобетонных конструкций являются трещины. Причины появления и развития трещин в железобетоне носят различный характер. Наиболее распространенными из них являются температурно-усадочные деформации при остывании и затвердевании бетона, технологические ошибки, допущенные при бетонировании конструкции, деформации опор, неравномерные осадки фундаментов и грунта основания. Однако самыми опасными являются силовые трещины, вызванные истощением несущей способности по прочности, жесткости и трещиностойкости. Поэтому при обнаружении трещин перед инженерами-обследователями всегда встает трудная задача – определить истинную причину их появления, чтобы принять решение о необходимости усиления или выдаче заключения о работоспособности конструкции.

Зачастую регламентированными в нормативной документации методами невозможно исключить силовой характер образования трещин. Результаты выполненного поверочного расчета лишь с некоторой долей вероятности можно принять достоверными. На заводах-изготовителях сборных железобетонных изделий проводят экспериментальные натурные испытания конструкций статическим и динамическим нагружением по разработанной методике, представленной в государственном стандарте.

Но такой методики, официально регламентированной стандартом, для уже возведенных и эксплуатируемых конструкций нет.

В данном исследовании приведено описание применения натурального испытания статическим нагружением монолитной плиты перекрытия реконструируемого здания в период строительства. За основу принята методика, изложенная в ГОСТ 8829-2018.

**Цель исследования** – определить напряженно-деформированное состояние плиты перекрытия с учетом трещин, выявленных в ходе технического обследования, путем натуральных испытаний статическим нагружением и оценить эффективность применения данной методики.

## **Основание для проведения испытания**

Исследование проведено в построечных условиях для монолитной железобетонной плиты перекрытия подземной автопарковки на реконструируемом объекте. Конструктивная схема – каркасно-стеновая, где вертикальными несущими конструкциями являются монолитные стены толщиной 250 мм и колонны сечением 500×500 и 500×800 мм. Плита перекрытия – плоская с капителями колонн, толщиной 300 мм.

В ходе проведения технического обследования выявлены многочисленные трещины по нижней грани плиты перекрытия с шириной раскрытия от 0,05 до 0,3 мм. Поверочный расчет, выполненный с помощью программного обеспечения, реализующего метод конечных элементов, показал, что несущей способности плиты достаточно для восприятия деформаций и усилий. Однако (в силу важности и уникальности строящегося объекта) было принято решение о проведении статических испытаний плиты перекрытия вертикальной нагрузкой.

## **Методика испытания**

Перед началом испытания составлена программа работ, в которой излагается

методика и приводится обоснование этапов проведения исследования.

Для сопоставления экспериментальных результатов с теоретическими выполнен расчет плиты с учетом физической нелинейности на действие постоянных и кратковременных проектных нагрузок. По результатам расчета, максимальный прогиб от нормативной нагрузки (без учета собственного веса плиты) на участке испытания составляет 0,69 мм (допустимый – 45 мм). Максимальная ширина рас-

крытия трещин по верхней грани плиты (на опорных участках) составляет 0,152 мм (0,4 мм – максимально допустимая ширина раскрытия при кратковременном действии нагрузок). При этом, по данным расчета, силовые трещины в растянутой зоне в пролете возникать не должны.

На рисунках 1-2 представлены результаты расчета плиты по трещинообразованию. Для выбранного участка выявлена контрольная нагрузка, равная 8 кН/м<sup>2</sup>.

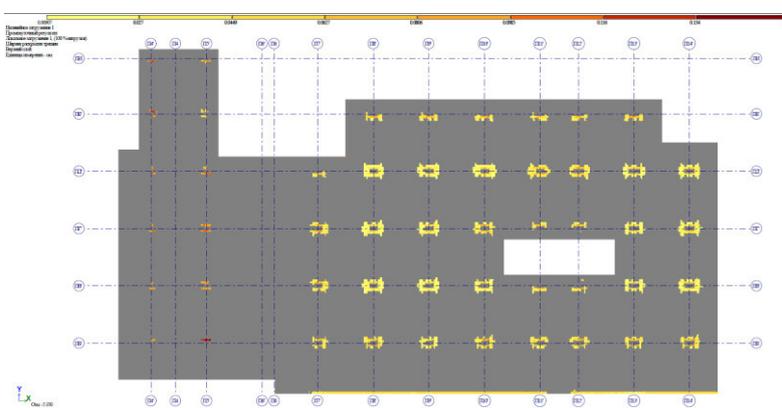


Рис. 1. Мозаика ширины раскрытия трещин в верхнем слое плиты  
Fig. 1. Mosaic of the crack opening width in the upper layer of the plate

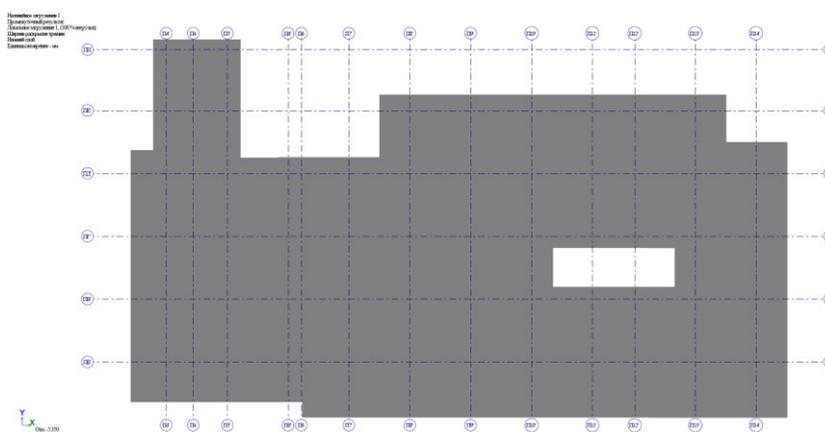


Рис. 2. Мозаика ширины раскрытия трещин в нижнем слое плиты  
Fig. 2. Mosaic of the crack opening width in the lower layer of the plate

Испытание статическим нагружением предполагает проведение замеров прогибов и ширины раскрытия трещин на контролируемых участках. Измерение прогибов произведено прогибомерами 6-ПАО с ценой деления 0,01 мм, которые установ-

ливались в точках, где перемещения и деформации являются наиболее характерными для исследуемой конструкции. В нашем случае прогибы измерялись в середине пролета. Чтобы исключить влияние осадки опор на величину измеряе-

мых прогибов, прогибомеры устанавливались также у опор исследуемого участка перекрытия.

На рисунке 3 представлена схема установки прогибомеров. Ширина раскрытия существующих трещин измерялась с помощью гипсовых маяков на 10 наиболее

характерных трещинах, установленных на двух участках каждой трещины.

Рисунок 4 иллюстрирует схему установки гипсовых маяков на трещинах. Ширина раскрытия трещин, образовавшихся в процессе испытаний, измерялась микроскопом МПБ-2 с ценой деления 0,05 мм.

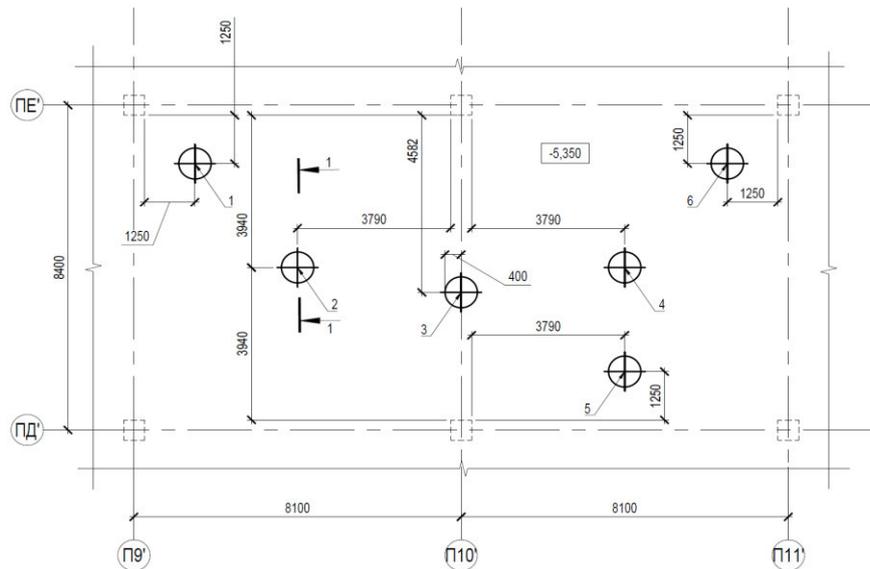


Рис. 3. Схема установки прогибомеров на исследуемом участке плиты перекрытия  
 Fig. 3. Diagram of the installation of deflection meters on the investigated section of the floor slab

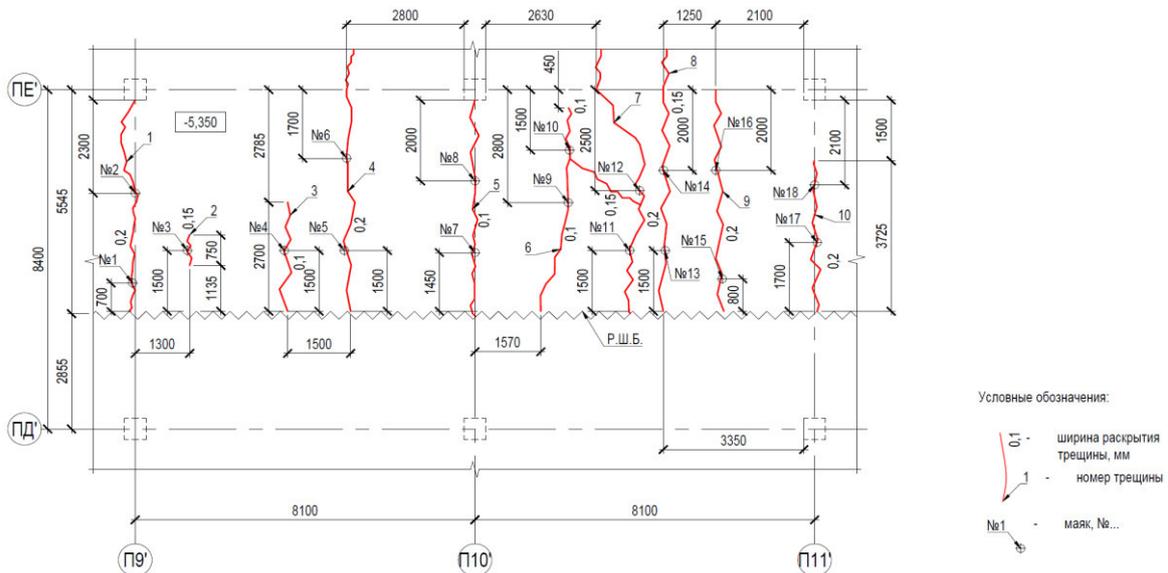


Рис. 4. Схема установки гипсовых маяков на трещины исследуемого участка плиты  
 Fig. 4. Scheme of installation of gypsum lighthouses on cracks of the investigated section of the plate

Непосредственно перед проведением натурального испытания статистическим нагружением выполнены следующие работы:

- проверка размеров конструкций, сечений элементов и соединений;
- определение толщины защитного

слоя бетона в плите перекрытия магнитным методом;

- тщательный осмотр поверхности конструкций с фиксацией всех существующих дефектов в ведомости дефектов и на плане перекрытия;

- установка гипсовых маяков на десяти наиболее характерных существующих трещинах;

- фиксация длины трещин путем засечек на концах трещины.

По результатам освидетельствования ширина раскрытия существующих трещин составила 0,1-0,2 мм. Длина трещин соответствует ширине участка плиты между швом перерыва бетонирования и краем плиты.

Полная расчетная нагрузка, на которую испытывалась плита перекрытия, составляет 808 кН.

Во время испытаний нагрузка прикладывалась ступенями, составляющими 20 % от контрольной нагрузки (по 161,6 кН).

Количество ступеней нагружения до достижения контрольной нагрузки было принято равным пяти. Нагрузка распределялась равномерно по участку испытания плиты согласно схеме загрузки (рис. 5).

В качестве нагрузки использовались стальные листы  $12 \times 5300 \times 1500$  мм, железобетонные блоки  $150 \times 600 \times 2200$  мм, железобетонные упоры, кирпич, бассейны с водой.

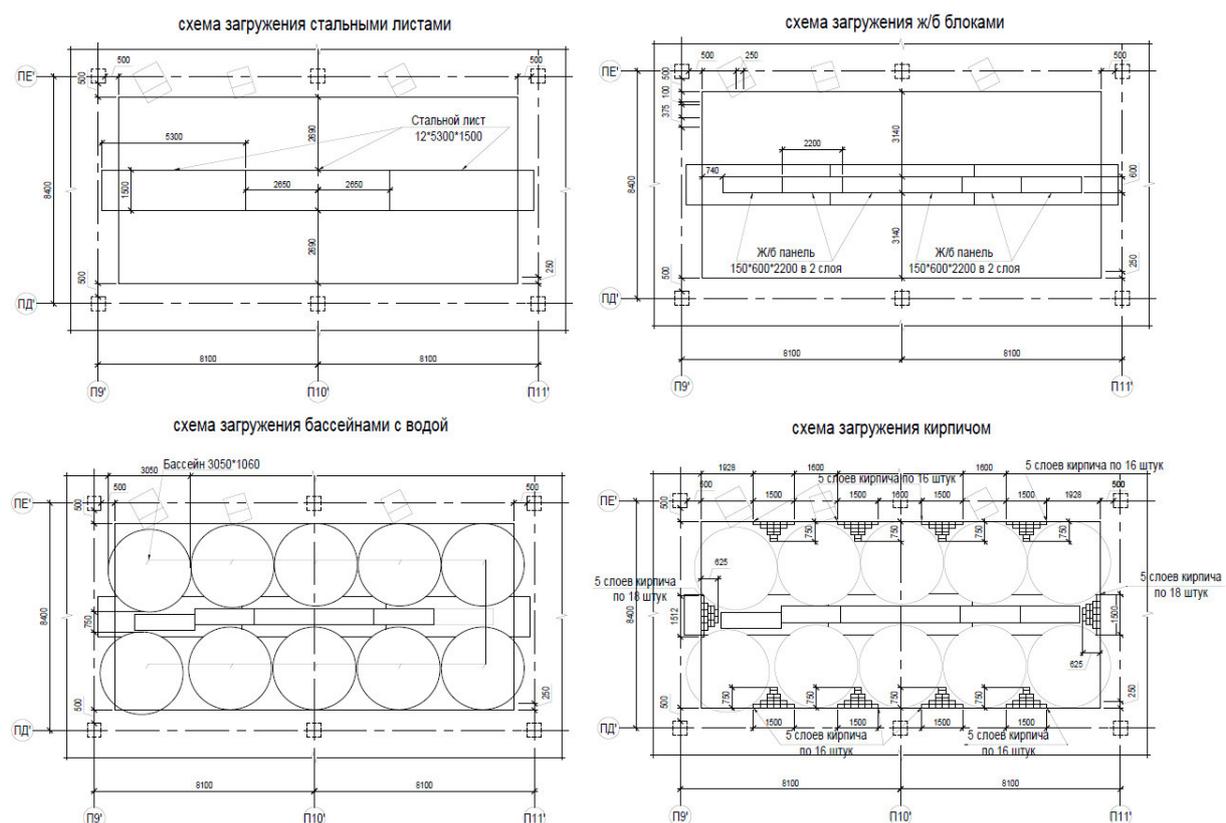


Рис. 5. Схема загрузки плиты перекрытия  
Fig. 5. The scheme of loading the floor slab

В ходе испытания соблюдалась следующая очередность загрузки:

- на 1-м этапе на участок перекрытия были нагружены стальные листы

$12 \times 5300 \times 1500$  мм, железобетонные блоки  $150 \times 600 \times 2200$  мм, ж/б упоры, кирпич и все 10 бассейнов были наполнены водой на высоту 9,5 см каждый;

- на каждом из последующих трех этапов все 10 бассейнов наполнялись водой в объеме  $1,616 \text{ м}^3$  в каждый (по 22,0 см по высоте бассейна);

- на 5-м этапе все 10 бассейнов наполнялись водой на высоту 15,0 см каждый.

До начала загрузки были приняты меры по предотвращению обрушения перекрытия. Под перекрытием были установлены регулируемые по высоте страховочные леса с зазором 5-6 см от низа плиты перекрытия.

### Результаты испытания

При проведении испытания контрольные замеры ширины раскрытия трещин и показания приборов (прогибометров) заносились в журнал. На пятом этапе нагружения конструкция выдержана 12 часов. По результатам испытания сделаны следующие **выводы**:

1. Ширина раскрытия сквозных трещин в плите, зафиксированных до начала испытаний, не изменилась в процессе испытания плиты нагружением, кроме трещины № 9 (маяк № 18). Увеличение ширины раскрытия трещины № 9 составило 0,05 мм. Ширина раскрытия этой трещины после выдержки плиты с полной нагрузкой в течение 12 часов составила 0,2 мм, что не превышает максимально допустимое значение в соответствии со СП 63.13330.2018 – 0,4 мм. Подтверждается температурно-усадочный и технологический характер этих трещин.

2. Силовых трещин на нижней и верхней поверхностях плиты в процессе испытания и после выдержки плиты с полной нагрузкой в течение 12 часов не образовалось.

3. Фактический максимальный прогиб от нагрузки (без учета собственного веса), полученный при испытаниях, составил 0,193 мм в точке П3 и 0,195 мм – в точке П4, что не превышает расчетный

прогиб от максимальной нагрузки (без учета собственного веса) – 0,69 мм.

4. В соответствии с ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния», на основании расчета по несущей способности и результатов статического испытания участка плиты нагружением состояние плиты перекрытия оценивается как работоспособное.

### Заключение

Проведено натурное испытание плиты перекрытия, имеющей трещины в пролете, путем статического нагружения вертикальной нагрузкой. Испытание осуществлено в условиях строительства, до эксплуатации плиты и нагружения проектной нагрузкой по методике испытания для сборных железобетонных изделий в заводских условиях и предшествующем опыте аналогичных испытаний.

При сравнении данных, полученных расчетным путем и в ходе эксперимента, можно сделать вывод, что современные нормативные требования для расчета железобетонных конструкций закладывают большой запас несущей способности по прочности, жесткости и трещиностойкости. В реальности при нагружении плиты контрольной нагрузкой не возникло усилий, достаточных для образования силовых трещин, прогнозируемых по результатам расчета. Из этого можно сделать вывод, что проведения поверочного расчета в ходе технического обследования достаточно для анализа несущей способности конструкции.

Натурные испытания – это трудоемкий, ресурсозатратный и дорогостоящий метод оценки напряженно-деформированного состояния конструкции. Однако он может быть оправдан при обосновании отказа от усиления конструкции, когда поверочный расчет показывает такую необходимость.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка коэффициентов предельных состояний деревянных конструкций на основе теории нечетких множеств / С. В. Федосов, В. Г. Котлов, А. Г. Поздеев, Ю. А. Кузнецова, А. В. Таран // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2022. № 2. С. 36-50.
2. Котлов В. Г., Поздеев А. Г., Кузнецова Ю. А. Интегральный показатель устойчивости деревянных конструкций // Вестник Приволжского территориального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук: сборник научных трудов. Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. С. 152-159.
3. Model of stress-strain state of three-layered reinforced concrete structure by the finite element methods / V. D. Tho, E. A. Korol, V. I. Rimshin, P. T. Anh // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. Vol. 18, no. 2. Pp. 62-73.
4. Римшин В. И., Кецко Е. С., Трунтов П. С. Этапы технического обследования конструкций административного здания // Жилищное строительство. 2020. № 6. С. 22-28.
5. Degradation damages survey of the silt reservoir structures / V. I. Rimshin, V. I. Kurbatov, V. T. Erofeev, E. S. Ketsko // Building and Reconstruction. 2022. No. 2 (100). Pp. 65-74.
6. Автоматизация решения задачи теплопереноса в древесине стропильных конструкций с нагелем методом Лапласа / С. В. Федосов, В. Г. Котлов, А. Г. Поздеев, Ю. А. Кузнецова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2021. № 2. С. 53-63.
7. Котлов В. Г., Кузнецова Ю. А. Расчет эффективности использования металлических зубчатых пластин для соединения дощатых ферм // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2019. № 3. С. 69-80.
8. Calculating the strengthening of construction structures before the reconstruction of the building / A. N. Neverov, E. S. Ketsko, P. S. Truntov, V. I. Rimshin // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 182. Pp. 173-179.
9. Комплексный подход к контролю качества высокопрочного бетона в период эксплуатации / В. И. Римшин, П. С. Трунтов, Е. С. Кецко, А. С. Нагуманова // Строительные материалы. 2020. № 6. С. 4-7.
10. Римшин В. И., Анпилов С. М., Трунтов П. С. Исследование несущей способности сборных железобетонных плит с внутренней распоркой // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2023. № 6 (1066). С. 27-29.
11. Римшин В. И., Кецко Е. С., Трунтов П. С. Результаты расчета усиления строительных конструкций здания методом конечных элементов // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. 2020. № 4(10). С. 67-78.
12. Автоматизация жизненного цикла зданий при реконструкции и капитальном ремонте / В. И. Римшин, И. Л. Шубин, В. Т. Ерофеев, А. А. Аветисян // Жилищное строительство. 2022. № 7. С. 6-12.
13. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, имеющих повреждения арматуры вследствие контакта с хлоридной агрессивной средой / В. И. Римшин, Л. А. Сулейманова, П. А. Амелин, А. А. Крючков // Эксперт: теория и практика. 2023. № 3 (22). С. 138-146.
14. Римшин В. И., Шубин Л. И., Савко А. В. Ресурс силового сопротивления железобетонных конструкций инженерных сооружений // Academia. Архитектура и строительство. 2009. № 5. С. 483-491.
15. Бондаренко В. М., Римшин В. И. Примеры расчета железобетонных и каменных конструкций: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Промышленное и гражданское строительство» направления подготовки дипломированных специалистов «Строительство». Москва: Высшая школа, 2006.
16. Развитие теории деградации бетонного композита / В. И. Римшин, А. А. Варламов, В. Л. Курбатов, С. М. Анпилов // Строительные материалы. 2019. № 6. С. 12-17.
17. Finite element modeling of the work of bent reinforced concrete elements of rectangular section in the abaqus software environment / P. A. Amelin, V. I. Rimshin, A. A. Kryuchkov, D. V. Obernikhin // Innovations and Technologies in Construction. 2023. Pp. 268-275.
18. Усиление конструкций здания текстильной промышленности внешним армированием из композитных материалов / В. И. Римшин, В. Л. Курбатов, Е. С. Кецко, П. С. Трунтов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 6 (396). С. 242-249.
19. Compressed reinforced concrete elements bearing capacity of various flexibility / A. L. Krishan, M. A. Astafeva, V. I. Rimshin, I. L. Shubin, A. A. Stupak // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 182. Pp. 283-291.
20. Engineering calculations of acidifier retaining walls during water treatment facilities designing / V. I. Rimshin, P. S. Truntov, I. S. Kuzina,

S. I. Roshchina, E. S. Ketsko // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 182. Pp. 55-73.

21. Римшин В. И., Кецо Е. С., Трунтов П. С. Проектные и расчётные решения при проектировании сооружений биологической очистки // Эксперт: теория и практика. 2020. № 6 (9). С. 31-39.

22. Assessment of the impact of high temperature on the strength of reinforced concrete structures during operation / V. I. Rimshin, V. I. Telichenko, P. S. Truntov, A. L. Krishan, G. S. Bykov // Key Engineering Materials. 2021. Vol. 887. Pp. 460-465.

23. Research of the degradation process of reinforced concrete structures / A. A. Varlamov, V. I. Rimshin, A. Davydov, A. R. Minnatov, A. M. Kurbatov // IOP Conference Series: Materials

Science and Engineering. 2021. Vol. 1079. Pp. 062005.

24. Eryshev V. A., Karpenko N. I., Rimshin V. I. The parameters ratio in the strength of bent elements calculations by the deformation model and the ultimate limit state method // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019". 2020. Pp. 022076.

25. Deformation models of concrete strength calculation in the edition of russian and foreign norms / N. I. Karpenko, V. I. Rimshin, V. A. Eryshev, L. I. Shubin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019". 2020. Pp. 052043.

Статья поступила в редакцию 12.03.2024; одобрена после рецензирования 12.04.2024; принята к публикации 31.05.2024

### Информация об авторах

*РИМШИН Владимир Иванович* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры жилищно-коммунального комплекса, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), член-корреспондент РААСН, г. Москва. Область научных интересов – теоретические основы силового сопротивления строительных конструкций зданий и сооружений, подверженных деградационным повреждениям. Расчет и конструирование энергоэффективных конструкций в жилищно-коммунальном хозяйстве и строительстве. Автор более 680 научных публикаций, в том числе 110 работ в системах WOS и SCOPUS, 52 учебников и учебных пособий с грифом Минобрнауки, 32 патента РФ и авторских свидетельств. E-mail: v.rimshin@niisf.ru

*ТРУНТОВ Павел Сергеевич* – аспирант кафедры жилищно-коммунального комплекса, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва. Область научных интересов – техническое обследование зданий и сооружений, проектирование и непосредственное выполнение работ по реконструкции и ремонту зданий и сооружений, техническая эксплуатация зданий. Автор более 50 научных публикаций. E-mail: pavel\_truntov@mail.ru

*КИСЛОВА Виктория Валерьевна* – магистрант кафедры строительной и теоретической механики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва. Область научных интересов – комплексное техническое обследование зданий и сооружений, поверочные расчеты конструкций. E-mail: viktoriya\_kislova22@mail.ru

*КИСЛОВА Екатерина Валерьевна* – магистрант кафедры строительной и теоретической механики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва. Область научных интересов – усиление строительных конструкций. E-mail: katerina22kislova@mail.ru

**Вклад авторов:** авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 69.07

DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.47>

EDN: HMOUEX

**Assessment of the stress-strain state of building structures by field tests during operation****V. I. Rimshin<sup>1,2✉</sup>, P. S. Truntov<sup>1</sup>, V. V. Kislova<sup>1</sup>, E. V. Kislova<sup>1</sup>**<sup>1</sup>National Research Moscow State University of Civil Engineering (Moscow)<sup>2</sup>Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (Moscow)

v.rimshin@niisf.ru ✉

**Abstract.** *Introduction.* Engineers nowadays encounter a variety of contentious scenarios when doing a technical inspection of a building. Determining the type of cracks that have been found in reinforced concrete structures is one example of this. The process of doing the structural verification calculation, which enables the design scheme to be simulated and the stress-strain state to be analysed to find potentially risky areas and force cracks, has been used for a long time and has proved its effectiveness. However, in some cases, the verification calculation may not be sufficient. This article presents the results of an assessment of the stress-strain state by conducting a full-scale static loading test of the floor slab of the reconstructed building, taking into account the cracks identified during the technical inspection of the building. The test was carried out in the conditions of the current construction. The execution of full-scale testing on reinforced concrete during the operational period is not currently governed by any regulatory documents. However, there exist guidelines for evaluating precast concrete objects in manufacturing settings and on laboratory test benches. In order to conduct such tests on operating constructions, in each specific case it is necessary to develop a work programme, which is a kind of research to substantiate the correctness and plausibility of the test results.

*The aim of research* is to determine the stress-strain state of the floor slab, taking into account the cracks identified during the technical inspection, by full-scale static loading tests, as well as to evaluate the effectiveness of this method.

*Materials and methods.* This study contains a methodology for conducting full-scale testing of the floor slab. The justification of the basis for performing a full-scale test of the floor slab is given. The work programme, measuring instruments, and equipment used are described. A calibration calculation of the plate was carried out to obtain the predicted test results. The description of the loading scheme and the materials used to create the actual control load at the test site are given.

*Research results.* Qualitative and quantitative indicators of changes in the stress-strain state of the floor slab during static loading are given. The conclusion is made about the technical condition of the structure in accordance with current regulations. It was possible to draw conclusions about the efficacy of the technique outlined based on the field test findings.

*Conclusion.* A summary is provided of the study's findings. The effectiveness of testing building structures on a large scale to ascertain their stress-strain condition is concluded.

**Keywords:** stress-strain state; crack resistance; rigidity; field tests; static loading; deflection; crack opening width; deflection meter.

**Funding:** this research received no external funding.

---

**For citation:** Rimshin V. I., Truntov P. S., Kislova V. V., Kislova E. V. Assessment of the stress-strain state of building structures by field tests during operation. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies.* 2024;(1):47–57. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.47>; EDN: HMOUEX

---

## REFERENCES

1. Fedosov S. V., Kotlov V. G., Pozdeev A. G., Kuznetsova Yu. A., Taran A. V. Estimation of coefficients of limit states of wooden structures based on the theory of fuzzy sets. *Bulletin of the Volga State*

*University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies.* 2022;(2):36-50. (In Russ.).

2. Kotlov V. G., Pozdeev A. G., Kuznetsova Yu. A. Integral indicator of the stability of wooden structures in the collection. *Bulletin of the Volga Territorial Branch of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences: collection of scientific papers.* Nizhny Novgorod; 2021:152-159. (In Russ.).

3. Vu Dinh Tho, Korol E. A., Rimshin V. I., Pham Tuan Anh. Model of stress-strain state of three-layered reinforced concrete structure by the finite element methods. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering.* 2022;18(2):62-73.

4. Rimshin V. I., Ketsko E. S., Trunov P. S. Stages of technical inspection of administrative building structures. *Housing construction.* 2020;(6):22-28. (In Russ.).

5. Rimshin V. I., Kurbatov V. L., Erofeev V. T., Ketsko E. S. Degradation damages survey of the silt reservoir structures. *Building and Reconstruction.* 2022;(2):65-74.

6. Fedosov S. V., Kotlov V. G., Pozdeev A. G., Kuznetsova Yu. A. Automation of solving the problem of heat transfer in wood of rafter structures with a nail by the Laplace method. *Bulletin of the Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies.* 2021;(2):53-63. (In Russ.).

7. Kotlov V. G., Kuznetsova Yu. A. Calculation of the efficiency of using metal toothed plates for connecting plank farms. *Bulletin of the Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies.* 2019;(3):69-80. (In Russ.).

8. Neverov A. N., Ketsko E. S., Truntov P. S., Rimshin V. I. Calculating the strengthening of construction structures before the reconstruction of the building. *Lecture Notes in Civil Engineering.* 2022;182:173-179.

9. Rimshin V. I., Truntov P. S., Ketsko E. S., Nagumanova A.S. An integrated approach to quality control of high-strength concrete during operation. *Building materials.* 2020;(6):4-7. (In Russ.).

10. Rimshin V. I., Anpilov S. M., Truntov P. S. Investigation of the bearing capacity of prefabricated reinforced concrete slabs with an internal spacer. *BST: Bulletin of construction machinery.* 2023;(6):27-29. (In Russ.).

11. Rimshin V. I., Ketsko E. S., Truntov P. S. The results of calculating the reinforcement of building structures by the finite element method. *Bulletin of the Vologda State University. Series: Technical Sciences.* 2020;(4):67-78. (In Russ.).

12. Rimshin V. I., Shubin I. L., Yerofeev V. T., Avetisyan A. A. Automation of the life cycle of

buildings during reconstruction and major repairs. *Housing construction.* 2022;(7):6-12. (In Russ.).

13. Rimshin V. I., Suleymanova L. A., Amelin P. A., Kryuchkov A. A. Experimental studies of bent reinforced concrete elements with reinforcement damage due to contact with an aggressive chloride medium. *Expert: theory and practice.* 2023;(3):138-146. (In Russ.).

14. Rimshin V. I., Shubin L. I., Savko A. V. Resource of force resistance of reinforced concrete structures of engineering structures. *Academia. Architecture and construction.* 2009;(5):483-491. (In Russ.).

15. Bondarenko V. M., Rimshin V. I. Examples of calculation of reinforced concrete and stone structures a textbook for students of higher educational institutions studying in the specialty "Industrial and civil engineering" areas of training of certified specialists "Construction". Ser. For higher education institutions. Construction. Moscow; 2006. (In Russ.).

16. Rimshin V. I., Varlamov A. A., Kurbatov V. L., Anpilov S. M. Development of the theory of degradation of concrete composite. *Building materials.* 2019;(6):12-17. (In Russ.).

17. Amelin P. A., Rimshin V. I., Kryuchkov A. A., Obernikhin D. V. Finite element modeling of the work of bent reinforced concrete elements of rectangular section in the abaqus software environment. *Innovations and Technologies in Construction.* 2023:268-275.

18. Rimshin V. I., Kurbatov V. L., Ketsko E. S., Trunov P. S. Reinforcement of structures of the textile industry building by external reinforcement of composite materials. *Izvestia of higher educational institutions. Technology of the textile industry.* 2021;(6):242-249. (In Russ.).

19. Krishan A. L., Astafeva M. A., Rimshin V. I., Shubin I. L., Stupak A. A. Compressed reinforced concrete elements bearing capacity of various flexibility. *Lecture Notes in Civil Engineering.* 2022;182:283-291.

20. Rimshin V. I., Truntov P. S., Kuzina I. S., Roshchina S. I., Ketsko E. S. Engineering calculations of acidifier retaining walls during water treatment facilities designing. *Lecture Notes in Civil Engineering.* 2022;(182):55-73.

21. Rimshin V. I., Ketsko E. S., Trunov P. S. Design and calculation solutions for the design of biological treatment facilities. *Expert: theory and practice.* 2020;(6):31-39. (In Russ.).

22. Rimshin V. I., Telichenko V. I., Truntov P. S., Krishan A. L., Bykov G. S. Assessment of the impact of high temperature on the strength of reinforced concrete structures during operation. *Key Engineering Materials.* 2021;887:460-465.

23. Varlamov A. A., Rimshin V. I., Davydov A.,

Minnatov A. R., Kurbatov A. M. Research of the degradation process of reinforced concrete structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1079:062005.

24. Eryshev V. A., Karpenko N. I., Rimshin V. I. The parameters ratio in the strength of bent elements calculations by the deformation model and the ultimate limit state method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International*

*Science and Technology Conference "FarEastCon 2019"*. 2020:022076.

25. Karpenko N. I., Rimshin V. I., Eryshev V. A., Shubin L. I. Deformation models of concrete strength calculation in the edition of russian and foreign norms. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019"*. 2020:052043.

The manuscript was submitted on 12.03.2024; reviewed on 12.04.2024; adopted for publication on 31.05.2024

### Information about the authors

*RIMSHIN Vladimir Ivanovich* – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Housing and Communal Complex of the National Research Moscow State University of Civil Engineering, Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN), Corresponding Member of the RAASN, Moscow. Research interests – theoretical foundations of force resistance in building constructions subject to degradation damage. Calculation and design of energy-efficient structures in housing and communal services and construction. Author of more than 680 publications, including 110 works indexed in WoS and SCOPUS, 52 student manuals approved by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, 32 patents for inventions of the Russian Federation. E-mail: v.rimshin@niisf.ru

*TRUNTOV Pavel Sergeevich* – postgraduate student of the National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow. Research interests – technical inspection of buildings and structures; design and direct execution of works on reconstruction and repair of buildings and structures; technical operation of buildings. Author of more than 50 publications. E-mail: pavel\_truntov@mail.ru

*KISLOVA Victoria Valerevna* – Master student of the Department of Structural and Theoretical Mechanics, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow. Research interests – complex technical inspection of buildings and structures, verification calculations of structures. E-mail: viktoriya\_kislova22@mail.ru

*KISLOVA Ekaterina Valerevna* – Master student of the Department of Structural and Theoretical Mechanics, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow. Research interests – reinforcement of building structures. E-mail: katerina22kislova@mail.ru

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this paper.

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest.

The authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

Научная статья

УДК 624.014+624.046+627.2+691.714

DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.58>

EDN: LPXELJ

## Особенности расчета надежности поврежденных стальных конструкций

М. А. Алейникова, Н. Ю. Сойту<sup>✉</sup>

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (г. Санкт-Петербург)  
natali\_s01@mail.ru<sup>✉</sup>

**Аннотация.** *Введение.* Конструкционная сталь в силу высокой прочности, малого собственного веса и превосходных сейсмических характеристик широко используется в промышленных зданиях и сооружениях. Например, непрерывные стальные балки, состоящие из двух и более пролетов, обычно применяются в каркасных зданиях и мостах. Их конструкция не только обеспечивает условие прочности, но и минимизирует их массу и материальные затраты. Однако вследствие воздействия окружающей среды стальные конструкции подвергаются коррозии. Из-за накопления коррозионных повреждений снижаются несущая способность стальных конструкций и уровень безопасности их эксплуатации. Поэтому одной из основных задач в области строительства является обеспечение надежности и долговечности стальных конструкций при процессе их эксплуатации. Основными вариантами решения этой задачи являются управление эксплуатационным сроком службы зданий и сооружений в реальных средах, правильный выбор конструктивных и технологических решений при усилении существующей конструкции.

*Цель статьи* – рассмотрение особенностей расчета надежности поврежденных стальных конструкций.

В ходе работы использовались следующие *методы*: математическое моделирование, прогнозирование, систематизация, экспериментальные исследования, обобщение.

*Результаты.* Для оценки надежности стальной конструкции в зависимости от срока ее службы, воздействия агрессивной внешней среды и старения самого металла представляется целесообразным принимать во внимание предыдущую историю ее работы, а также использовать комбинацию метода Монте-Карло (МК) и метода конечных элементов (МКЭ), которые дают возможность оценить коррозионные потери поперечного сечения стальной балки. Предыдущую историю накопленной усталости материала предлагается определять через левостороннее усечение кривой нормального распределения Гаусса случайной величины сопротивления. Атмосферная коррозия металлов – сложный процесс, зависящий от большого числа взаимодействующих факторов окружающей среды. Для оценки коррозионных потерь, глубины коррозии предлагается использовать модель, в которой учтены влияние диоксида серы через его концентрацию и скорость осаждения хлоридов. В качестве имитационного моделирования выбран метод Монте-Карло, который адаптирован к определению вероятности ненадежности систем стальных конструкций; приведен алгоритм этого определения.

*Выводы.* Представлен подход к оценке надежности непрерывной стальной балки в зависимости от времени ее службы и с учетом коррозионного воздействия атмосферной окружающей среды на базе комбинации методов МК и МКЭ.

**Ключевые слова:** стальная конструкция; надежность; коррозия; повреждение; узел; метод Монте-Карло; метод конечных элементов

**Финансирование:** авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

---

**Для цитирования:** Алейникова М. А., Сойту Н. Ю. Особенности расчета надежности поврежденных стальных конструкций // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2024. № 1 (29). С. 58–65. DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.58>; EDN: LPXELJ

---

## Введение

Конструкционная сталь – это материал, широко используемый в заводских зданиях, обладающий высокой прочностью, малым собственным весом и превосходными сейсмическими характеристиками [1]. Например, непрерывные стальные балки, состоящие из двух и более пролетов, обычно используются в каркасных зданиях и мостах. Их конструкция не только обеспечивает условие прочности, но и минимизирует их массу и материальные затраты. Однако, как известно, стальные конструкции подвергаются коррозии под воздействием окружающей среды. В результате несущая способность и, следовательно, уровень их безопасности со временем снижаются из-за накопления коррозионных повреждений (например, потери сечения). Уровень неопределенности в отношении характеристик конструкции возрастает из-за нечеткости, присущей процессу разрушения. Скорость коррозии часто неравномерна и трудно предсказуема [2, 3].

В связи с этим следует отметить, что одной из основных задач в области строительства является обеспечение надежности и долговечности стальных конструкций при процессе их эксплуатации. Основными вариантами решения этой задачи являются управление эксплуатационным сроком службы зданий и сооружений в реальных средах, правильный выбор конструктивных и технологических решений при усилении существующей конструкции [4].

Оценка надежности и долговечности стальных элементов при коррозии металла вызывает интерес многих исследований. Учеными разработаны различные методы оценки надежности конструктивных элементов и систем, а также подходы к расчету приближенных границ вероятности отказа металлических конструкций. Однако, несмотря на имеющиеся труды и наработки, сегодня эта

проблема изучена еще недостаточно и поэтому требует дальнейшего исследования. Дополнительную ценность имеют попытки теоретического определения возможного воздействия агрессивной среды на металлические конструкции, это позволило бы не проводить сложные экспериментальные испытания.

Итак, обозначенные обстоятельства предопределили выбор темы данной статьи.

Особенности использования модельных представлений стальных конструкций и уравнений механического состояния материалов, которые в формализованном виде отражают результат воздействия внешней среды, описаны в работах И. Т. Мирсаяпова [5], А. Р. Туснина [6], А. А. Соловьевой [7], В. С. Сафронова [8], С. С. Мехтиевой [9], В. П. Королева [10], В. Д. Райзера [11].

Алгоритм оценки технического состояния стальной фермы, в ходе которого производится комплекс работ по установлению фактического износа конструкций и определению соответствия нагрузкам и воздействиям, представлен в трудах Д. И. Королькова [12], Н. А. Бузало [13], Д. Н. Кузнецова [14], Е. А. Чайкина [15], Ю. Л. Виноградовой [16], Т. А. Паутовой [17], В. А. Шорина [18], И. И. Ведякова и Д. В. Соловьева [19].

Отдавая должное накопленному на сегодняшний день научному наследию и экспериментальному опыту, отметим, что ряд вопросов требует более пристального внимания. Так, в развитии нуждается методологический подход к определению несущей способности стальных конструкций в результате воздействия агрессивной среды, в том числе в условиях изменения климата. Особого внимания заслуживает разработка инженерной методики расчета таких конструкций, преимуществом которой должна стать простота в использовании и учет требований действующих нормативных документов.

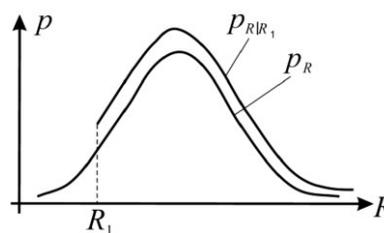
**Цель работы** заключается в рассмотрении особенностей расчета надежности поврежденных стальных конструкций.

В ходе работы использовались следующие **методы**: математическое моделирование, прогнозирование, систематизация, экспериментальные исследования, обобщение.

**Результаты исследования**

Для оценки надежности стальной конструкции в зависимости от срока ее службы, воздействия агрессивной внешней среды и старения самого металла представляется целесообразным принимать во внимание предыдущую историю ее работы, а также использовать комбинацию метода Монте-Карло (МК) и метода конечных элементов (МКЭ), которые дают возможность оценить коррозионные потери поперечного сечения стальной балки.

Итак, пусть известно, что в процессе предварительной эксплуатации конструкции был достигнут определенный уровень внутренних усилий в элементах системы, которому соответствовало сопротивление  $R_1$ , отказы в данном случае не наблюдались. При этом можно принять во внимание, что происходит левостороннее усечение кривой распределения случайной величины сопротивления, и, таким образом, считать, что в рассматриваемой конструкции фактически отсутствует вероятность встретить величину расчетного сопротивления меньше чем  $R_1$ . Другими словами, в расчет принимаются только такие параметры сопротивления, для которых выполняется условие  $R \geq R_1$ . Подходящая кривая плотности вероятности  $p_R$  превращается в кривую  $p_{R|R_1}$  (см. рисунок).



Эффект левостороннего усечения [18]  
The effect of left-sided truncation [18]

Безусловно, можно считать, что напряжения  $R_1$  соответствуют значениям, возникающим под влиянием действия зафиксированной постоянной нагрузки. Могут учитываться и напряжения от других нагрузок, если существуют заслуживающие доверия данные, которые свидетельствуют о самих фактах реализации таких нагрузок и содержат достоверные сведения относительно их фактических характеристик. Если используется левостороннее усечение, то кривая плотности при  $R \geq R_1$  имеет вид

$$p_{R|R_1}(R) = \mu_R \cdot p_R(R),$$

где коэффициент усечения

$$\mu_R = \frac{1}{1 - \int_0^{R_1} p_R(x) dx} = \frac{1}{1 - P_{R_1}(R)}$$

Тогда общий вид формулы для расчета вероятности безотказной работы стальной конструкции принимает форму

$$P_{R|R_1} = \int_{R_1}^{\infty} p_R(x) P_s(S) dx,$$

где  $P_s(S)$  – интегральная функция распределения усилия.

Интеграл в этом выражении может быть трансформирован следующим образом:

$$P_{R|R_1} = \int_{R_1}^{\infty} p_{R|R_1}(R) \left[ \int_0^R p_s(x) dx \right] dR = \mu_R \left[ \int_0^{\infty} p_R(R) P_s(S) dR - \int_0^{R_1} p_R(y) P_s(S) dy \right] = \mu_R [P_s - P_{s,1}],$$

где  $P_s$  – вероятность безотказного состояния при отсутствии усечения;

$P_{s,1}$  – вероятность безотказного состояния при сопротивлениях  $R \geq R_1$ .

Атмосферная коррозия металлов – сложный процесс, зависящий от большого числа взаимодействующих факторов окружающей среды [20]. Для оценки коррозионных потерь предлагаем использовать следующую модель:

$$d(t) = At^B \left( \frac{TOW}{C} \right)^D \cdot \left( 1 + \frac{[SO_2]}{E} \right)^F \times \left( 1 + \frac{[Cl]}{G} \right)^H e^{j(T+T_0)},$$

где  $d(t)$  – глубина коррозии, мкм;

$t$  – время выдержки, годы;

$TOW$  – время увлажнения, ч/год;

$[SO_2]$  – концентрация диоксида серы, мкг/м<sup>3</sup>;

$[Cl]$  – скорость осаждения хлоридов, мкг/м<sup>2</sup>/сут;

$T$  – температура выдержки, °C;

$T_0$  – эмпирический коэффициент;

$A, B, C, D, E, F, G, H, J$  – численные значения, установленные в ходе испытаний.

Метод имитационного моделирования МК основан на использовании псевдослучайных чисел и закона больших чисел для оценки надежности любой системы [21-23]. Если безопасная область определяется условием  $f(X) > 0$ , где  $X$  – случайный вектор, содержащий все входные случайные величины, то вероятность ненадежности системы можно вычислить следующим образом:

$$P_f = \int I_{f(X)<0} f_x(x) dx = E[I_{f(X)<0}],$$

где  $I_{f(X)<0}$  – индикаторная функция:

$$I_{f(X)<0} = \begin{cases} 1, & \text{если } f(X) < 0; \\ 0, & \text{если } f(X) \geq 0. \end{cases}$$

Расчетная программа для оценки надежности стальной балки непрерывного сечения была разработана с использованием МКЭ, модели коррозии с входными параметрами, основанными на сценарии изменения климата, и МК-имитации.

Оценка надежности сплошной стальной балки проводилась для различных длительностей коррозии – 10, 20, 50 и 100 лет. Обобщенные значения вероятности безопасности при моделировании МК непрерывной стальной балки с учетом коррозии ее металла приведены в таблице.

#### Вероятность безопасности непрерывной стальной балки

The probability of safety of a continuous steel beam

Годы	0	10	20	50	100
Вероятность безопасности (%)	96,77	81,44	75,91	68,61	63,08

#### Вывод

В статье представлен подход к оценке надежности непрерывной стальной балки в зависимости от времени ее службы и с учетом коррозионного воздействия изменения климата на базе комбинации МК и МКЭ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lin Youzhu. Theoretical models and reliability assessment of steel-UHPC-steel composite beams in offshore structures // Ocean engineering. 2023. P. 78-84.

2. Лукин Е. К., Себешев В. Г. Надежность и долговечность трубчатых элементов стальных конструкций при коррозионных повреждениях // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2023. № 2 (9). С. 78-84.

3. Tran Ngoc-Long, Phan Van-Phuc, Valeriy Morozov. Investigation the corrosion initiation

process in reinforced concrete structures under the impact of climate change // Architecture and engineering. 2021. Vol. 6, no. 2. P. 37-44.

4. Надольский В. В. Коэффициенты надежности для нелинейных моделей несущей способности балок с гибкой стенкой // Вестник МГСУ. 2023. № 6. С. 852-863.

5. Мирсаяпов И. Т. Исследование напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных балок с частичной заделкой двутавровых сечений в бетоне // Известия Казанского государ-

ственного архитектурно-строительного университета. 2022. № 3 (61). С. 56-66.

6. Туснин А. Р. Численный расчет сталежелезобетонных конструкций // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12, № 1. С. 61-73.

7. Соловьева А. А. Метод оценки надежности элементов плоских ферм на основе р-блоков // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16, № 2. С. 153-167.

8. Сафронов В. С. Надежность стропильной фермы покрытия из тонкостенных профилей «Молодечно» // Строительная механика и конструкции. 2022. № 2 (33). С. 123-132.

9. Мехтиева С. С. Системный подход к оценке эффективности конструктивных решений стальных трапециевидных ферм покрытий // Инновации и инвестиции. 2022. № 9. С. 167-170.

10. Королев В. П. Эволюция концептуальных подходов к управлению коррозионной защищенностью стальных конструкций и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 8. С. 32-40.

11. Райзер В. Д. Теория надежности сооружений. Москва: АСВ, 2010. 384 с.

12. Корольков Д. И., Шубина Ю. И. Разработка методики определения физического износа стальных колонн // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15, № 2. URL: <https://esj.today/PDF/63SAVN223.pdf>

13. Бузало Н. А. Снижение силового сопротивления стальных колонн производственных зданий, получивших коррозионные повреждения при эксплуатации // Строительство и архитектура. 2020. Т. 8, № 4. С. 9-13.

14. Кузнецов Д. Н. Оценка устойчивости несущих конструкций при численном моделировании // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2022. № 1 (20). С. 9-16.

15. Чайкин Е. А. Изучение напряженно-деформированного состояния узла структурной конструкции на клеенных стальных пластинах //

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24, № 4. С. 99-109.

16. Виноградова Ю. Л. Исследование надежности элементов инженерных сооружений путем генерации случайных величин // Вестник Вологодского государственного университета. 2023. № 2 (20). С. 12-14.

17. Паутова Т. А. Анализ методов вибродиагностики металлических конструкций // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 10 (739). С. 16-23.

18. Шорин В. А. Повышение надежности стальных резервуаров для хранения фосфорной кислоты // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23, № 6. С. 157-164.

19. Ведяков И. И., Соловьев Д. В. Разработка методики оценки риска прогрессирующего обрушения // Вестник НИЦ «Строительство». 2021. № 28(1). С. 5-15.

20. Терехов И. А., Корожан А. И. Сравнение конструктивных решений железобетонных и металлических ферм с учетом эксплуатационных показателей // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 92-15. С. 97-103.

21. Иньков А. Э. Оценка индекса надежности стальных ферм по критерию жесткости при интервальной неопределенности данных // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19, № 1. С. 46-55.

22. Адамцевич Л. А., Кац В. А. Модель оценки надежности строительных систем на опасных производственных объектах в процессе их эксплуатации // Строительное производство. 2023. № 2. С. 102-105.

23. Масленников А. М., Кобелев Е. А., Масленников Н. А. Решение задач устойчивости методом конечных элементов // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 2 (79). С. 68-74.

Статья поступила в редакцию 02.03.2024; одобрена после рецензирования 03.04.2024; принята к публикации 03.06.2024

### Информация об авторах

*АЛЕЙНИКОВА Маргарита Анатольевна* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительной механики, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург. Область научных интересов – техническое обследование зданий и сооружений, техническая эксплуатация зданий. Автор более 30 научных публикаций. E-mail: ale11971\_80@mail.ru

*СОЙТУ Наталья Юрьевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры строительной механики, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург. Область научных интересов – техническое обследование зданий

и сооружений, техническая эксплуатация зданий. Автор более 30 научных публикаций.  
E-mail: natali\_s01@mail.ru

**Вклад авторов:** авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

---

Scientific article

УДК 624.014+624.046+627.2+691.714

DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.58>

EDN: LPXELJ

## Reliability assessment of damaged steel structures

*M. A. Aleinikova, N. Iu. Soitu*<sup>✉</sup>

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Saint Petersburg)

natali\_s01@mail.ru<sup>✉</sup>

**Abstract. Introduction.** In industrial buildings and constructions, structural steel is widely used due to its exceptional seismic qualities, low self-weight, and high strength. Frame buildings and bridges, for example, frequently use continuous steel beams with two or more spans. Not only does their design ensure strength, but it also reduces weight and material expenses. However, due to environmental influences, steel structures are subject to corrosion. As a result of corrosion damage accumulation steel structures lose some of their bearing capacity and operational safety. Ensuring the durability and reliability of steel structures during their operation is the main challenge for the construction industry. Managing the operational life of buildings and other structures in actual surroundings, as well as selecting the best structural and technological innovations while strengthening the existing framework, are the main approaches to deal with this issue.

*The aim of research* is to consider the features of the reliability assessment in damaged steel structures.

*Methods.* The following methods were used in research: mathematical modelling, forecasting, systematisation, experimental research, generalisation.

*Research results.* It seems appropriate to consider the steel structure's background operation and use a combination of the Monte Carlo method (MC) and the finite element method (FEM) to assess the corrosion losses of the cross section of a steel beam. This will allow for the assessment of a steel structure's reliability based on its service life, the effects of an aggressive external environment, and the ageing of the metal itself. The loading history of accumulated fatigue is determined using left-sided truncated normal Gaussian distribution of a random resistance value. Atmospheric corrosion of metals is a complex process that depends on a large number of interacting environmental factors. In order to assess corrosion losses and the depth of corrosion, it is proposed to use a model that takes into account the influence of sulphur dioxide through its concentration and the rate of chloride deposition. The Monte Carlo method based on the use of pseudorandom sampling and the strong law of large numbers to assess the reliability of any system is chosen as a simulation. The article presents an algorithm for determining the probability of unreliability of steel structural systems by adapting the MC approach.

*Conclusion.* The methodology that combines the finite element method with the Monte Carlo method is proposed to evaluate the reliability of a continuous steel beam based on its service life and the atmospheric environment's corrosive effects.

**Keywords:** steel structure; reliability; corrosion; damage; node; Monte Carlo method; finite element method

**Funding:** this research received no external funding.

---

**For citation:** Aleynikova M. A., Soyту N. Iu. Reliability assessment of damaged steel structures. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies.* 2024;(1):58–65. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.58>; EDN: LPXELJ

---

## REFERENCES

1. Lin Youzhu. Theoretical models and reliability assessment of steel-UHPC-steel composite beams in offshore structures. *Ocean engineering*. 2023;78-84.
2. Lukin Ye. K., Sebeshev V. G. Reliability and durability of tubular elements of steel structures in case of corrosion damage. *Fundamental'nyye i prikladnyye voprosy transporta*. 2023;(2):78-84. (In Russ.).
3. Ngoc-Long T., Van-Phuc Ph., Morozov V. Investigation the corrosion initiation process in reinforced concrete structures under the impact of climate change. *Architecture and engineering*. 2021;6(2):37-44.
4. Nadolskiy V. V. Reliability coefficients for nonlinear models of the load-bearing capacity of beams with a flexible wall. *Vestnik MGSU*. 2023;(6):852-863. (In Russ.).
5. Mirsayapov I. T. Investigation of the stress-strain state of steel-reinforced concrete beams with partial sealing of I-sections in concrete. *News of the Kazan State University of architecture and engineering*. 2022;(3):56-66. (In Russ.).
6. Tusnin A. R. Numerical calculation of steel-reinforced concrete structures. *Construction: science and education*. 2022;12(1):61-73. (In Russ.).
7. Solovyeva A. A. A method for assessing the reliability of elements of flat trusses based on p-blocks. *Vestnik MGSU*. 2021;16(2):153-167. (In Russ.).
8. Safronov V. S. Reliability of a rafter truss covering from thin-walled profiles "Molodechno". *Structural mechanics and structures*. 2022;(2):123-132. (In Russ.).
9. Mekhtiyeva S. S. A systematic approach to evaluating the effectiveness of structural solutions of steel trapezoidal coating trusses. *Innovation and Investment*. 2022;(9):167-170. (In Russ.).
10. Korolev V. P. Evolution of conceptual approaches to the management of corrosion protection of steel structures and structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2022;(8):32-40. (In Russ.).
11. Rayzer V. D. Theory of reliability of equipment. Moscow: ASV; 2010. 384 p. (In Russ.).
12. Korolkov D. I., Shubina Ju. I. Development of methods for determining the physical wear of steel columns. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023;15(2). Available from: <https://esj.today/PDF/63SAVN223.pdf> (In Russ.).
13. Buzalo N. A. Reduction of the force resistance of steel columns of industrial buildings that have received corrosion damage during operation *Construction and Architecture*. 2020;8(4):9-13. (In Russ.).
14. Kuznetsov D. N. Assessment of the stability of non-existent structures in numerical modeling. *Housing and utilities infrastructure*. 2022;(1):9-16. (In Russ.).
15. Chaykin Ye. A. Studying the stress-strain state of a structural design node on glued steel plates. *Journal of Construction and Architecture*. 2022;24(4):99-109. (In Russ.).
16. Vinogradova Yu. L. Investigation of reliability of elements of engineering structures by generating random variables. *Bulletin of Vologda State University*. 2023;(2):12-14. (In Russ.).
17. Pautova T. A. Analysis of methods of vibration diagnostics of metal structures. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2021;(10):16-23. (In Russ.).
18. Shorin V. A. Improving the reliability of steel tanks for phosphoric acid storage. *Journal of Construction and Architecture*. 2021;23(6):157-164. (In Russ.).
19. Vedyakov I. I., Solovyev D. V. Development of a methodology for assessing the risk of progressive disease. *Bulletin of the Scientific Research Center of Construction*. 2021;(28):5-15. (In Russ.).
20. Terekhov I. A., Korozhan A. I. Comparison of structural solutions of reinforced concrete and metal trusses taking into account operational indicators. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2022;(92-15):97-103. (In Russ.).
21. Inkov A. E. Evaluation of the reliability index of steel trusses according to the criterion of rigidity with an inter-val uncertainty of data. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2023;19(1):46-55. (In Russ.).
22. Adamtsevich L. A., Kats V. A. Model for assessing the reliability of construction systems at hazardous production facilities during their operation. *Construction production*. 2023;(2):102-105. (In Russ.).
23. Maslennikov A. M., Kobelev Ye. A., Maslennikov N. A. Solving problems of stability of the finite element method. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020;(2):68-74. (In Russ.).

The manuscript was submitted on 02.03.2024; reviewed on 03.04.2024;  
adopted for publication on 03.06.2024

### Information about the authors

*ALENIKOVA Margarita Anatolevna* – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Mechanics, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg. Research interests – technical inspection of buildings and structures, technical maintenance of buildings. Author of more than 30 publications. E-mail: ale11971\_80@mail.ru

*SOITU Natalia Iurevna* – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Mechanics, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg. Research interests – technical inspection of buildings and structures, technical maintenance of buildings. Author of more than 30 publications. E-mail: natali\_s01@mail.ru

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this paper.

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest.

The authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

Научная статья

УДК 624.041.63

DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.66>

EDN: MDWCVE

## Разработка теоретической модели для построения линий влияния вертикальных перемещений сечения трехшарнирной арки

*Р. А. Бикбаев<sup>✉</sup>, Е. Ф. Ежов*

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет  
им. Н. П. Огарёва (г. Саранск)  
[bikbaevra@yandex.ru](mailto:bikbaevra@yandex.ru)<sup>✉</sup>

**Аннотация.** *Введение.* Данная статья посвящена рассмотрению теоретических методов расчета трехшарнирных арок. Приведен обзор истории развития методик расчета и построения линий влияния для стержневых систем. Анализ теоретической и научно-методической литературы по указанной тематике показал преимущества и недостатки существующих методов и способов построения линий влияния для трехшарнирных арок. Теоретические и практические разработки авторов позволяют устранить недостатки известных методов.

*Цель исследования* заключается в разработке теоретических методов расчета трехшарнирных арок. Анализ источников по расчету арок показывает, что отсутствуют сведения о линиях влияния перемещений сечения арок.

*Результаты исследования.* На основе математических выкладок получены формулы, позволяющие построить линию влияния перемещений произвольного сечения ( $k$ ) трехшарнирной арки от действия единичной подвижной силы. Представлены основные положения этой методики и даны практические формулы, облегчающие построение линий влияния. Полученные аналитические выражения могут быть применены для практического расчета трехшарнирных арок.

*Выводы.* Проведенный численный анализ полученных результатов с помощью программного комплекса LIRA дает хорошие результаты. Эта методика внедряется в учебном процессе при изучении строительной механики в ходе подготовки инженеров строительных специальностей, а также в проверочных расчетах, связанных с обследованием технического состояния строительных конструкций, при разработке способов восстановления их работоспособности.

**Ключевые слова:** линия влияния; перемещение; трехшарнирная арка; опорная реакция; уравнение; изгибающий момент; интеграл Мора; шарнир; единичная сила; поперечная сила; продольная сила.

**Финансирование:** авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

---

**Для цитирования:** Бикбаев Р. А., Ежов Е. Ф. Разработка теоретической модели для построения линий влияния вертикальных перемещений сечения трехшарнирной арки // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2024. № 1 (29). С. 66–75. DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.66>; EDN: MDWCVE

---

## Введение

Первые расчеты стержневых конструкций берут свое начало еще в XIX веке. Методика построения линий влияния зародилась в 1854 году. Французский инженер Ж. А. К. Бресс составил таблицы «чисел влияния» для распора и опорных моментов бесшарнирной арки [1].

Через 13 лет после Бресса линии влияния для балки с заделанными концами, а затем и для арки построил Г. Винклер [2], доведя до конца идею Бресса и заслужив славу изобретателя линий влияния. В 1876 году Френкель применил этот метод к расчету статически определимой балки.

Для решения сложных задач позже были разработаны методы моментных точек Мюллера-Бреслау (1887 г.), Абрамова (1935 г.); метод замены стержней Геннеберга (1886 г.); метод замены связей (1901 г.); метод ложного положения.

В наши дни большой вклад в развитие стержневых структур внес доктор физико-математических наук М. Н. Кирсанов. Он рассматривает методы оптимизации стержневых структур, занимается популяризацией метода индукции в расчетах ферм [3-5].

В научных и методических изданиях авторов Ю. И. Бутенко и Н. А. Засяцько изложены различные способы построения линий влияния перемещений в консольных балках. Это отражено в учебниках по строительной механике указанных авторов [6].

В работе Е. Ф. Ежова и М. В. Мишина [7] предложены формулы для построения линий влияния шарнирно-опертых, статически определимых балок.

В. А. Киселевым рассмотрены расчеты двухшарнирных арок с очертанием по веревочной кривой [8]. Он приводит способы построения линий влияния внутренних усилий (изгибающих моментов  $M_k$ , поперечных сил  $Q_k$  и продольных сил  $N_k$ ) в заданном сечении  $k$  трехшарнирной арки. При этом используются методы нулевых точек, кинематический и способ наложения. Недостатком этих способов является отсутствие уравнений, описывающих величину искомых усилий  $M_k$ ,  $Q_k$

и  $N_k$  в зависимости от положения единичной вертикальной силы  $P = 1$ , расположенной на расстоянии  $x$  от правой опоры трехшарнирной арки.

В работе [9] Е. Ф. Ежовым и соавторами получены формулы, устраняющие неудобства вышеупомянутых методов. Однако здесь не приведены конкретные примеры расчета арки на подвижную нагрузку.

В статье [10] на основе теоретических выкладок из предыдущей работы саранскими учёными даются решения характерных практических задач. Эти задачи предлагаются в качестве расчетно-проектировочных работ для студентов строительных специальностей Архитектурно-строительного института Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва.

Анализ теоретической и научно-методической литературы по расчету арок показывает, что отсутствуют сведения о линиях влияния перемещений сечения арок, что обуславливает актуальность данного исследования.

**Цель исследований** – разработка теоретических методов расчета трехшарнирных арок.

В данной работе получены формулы, позволяющие построить линию влияния перемещений сечения ( $k$ ) трехшарнирной арки от действия единичной подвижной силы.

## Математическое моделирование

1.1. Определим опорные реакции от единичной силы  $P_k = 1$ , приложенной в точке определения вертикального перемещения ( $k$ ) (рис. 1–3).

$$\sum M_b = 0, R_a \cdot l - 1 \cdot b = 0, R_a = b/l;$$

$$\sum M_c = 0,$$

$$R_a \cdot l/2 - H_a \cdot f - 1 \cdot (b - l/2) = 0,$$

$$H_a = \frac{R_a \cdot l}{2 \cdot f} - \frac{(b - l/2)}{f} = \frac{b}{2f} - \frac{(b - l/2)}{f}.$$

$$\text{Примем } \frac{b}{2f} - \frac{(b - l/2)}{f} = c.$$

Упростим выражение

$$\frac{b}{2f} - \frac{(b-l/2)}{f} = c, \quad c = \frac{l-b}{2f}; \quad H_a = c.$$

Примем  $\frac{b}{l} = t$ , тогда  $R_a = \frac{b}{l} = t$ .

$$\sum Y = 0; \quad R_a - 1 + R_b = 0,$$

$$R_b = 1 - R_a = \left(1 - \frac{b}{l}\right),$$

$$R_b = (1-t), \quad H_b = c.$$

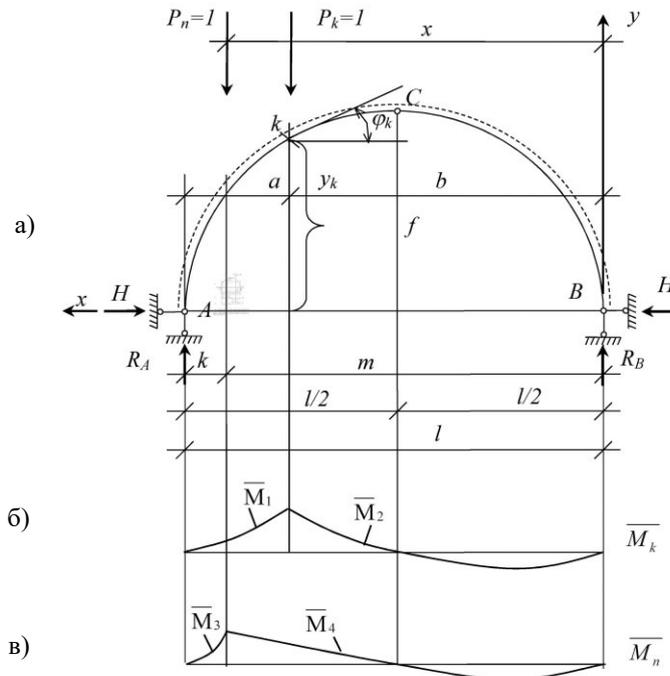


Рис. 1. Исходная расчетная схема трехшарнирной арки для определения усилий при  $b \leq x \leq l$  (а); эпюра моментов  $\bar{M}_k$  от действия единичной силы  $P_k = 1$ , приложенной в сечении  $k$  (б); эпюра моментов  $\bar{M}_n$  от действия единичной силы  $P_n = 1$ , приложенной в произвольном сечении  $n$  (в)

Fig. 1. The initial calculation scheme of a three-hinged arch for determining forces at  $b \leq x \leq l$  (a); the plot of moments from the action of a single force  $P_k = 1$  applied in section  $k$  (b); the plot of moments from the action of a single force  $P_n = 1$  applied in an arbitrary section  $n$  (c)

1.2. Определим опорные реакции от единичной силы  $P_n = 1$ , расположенной на расстоянии  $x$  от правой опоры (см. рис. 1).

$$M_1 = R_a(l-x) - H_a \cdot y =$$

$$= t(l-x) - c \frac{4f \cdot x \cdot (l-x)}{l^2};$$

$$M_2 = (1-t) \cdot x - c \cdot \frac{4f \cdot x \cdot (l-x)}{l^2};$$

$$R_a \cdot l - P_n \cdot m = 0; \quad R_a = \frac{P_n \cdot m}{l} = \frac{m}{l};$$

Примем выражение  $\frac{m}{l} = v$ , тогда

$$-H_a \cdot f + R_a \cdot l/2 - 1 \cdot (m - l/2),$$

$$H_a = \frac{m}{2f} - \frac{m - l/2}{f}.$$

$$\text{Примем } \frac{m}{2f} - \frac{m - l/2}{f} = g,$$

тогда  $H_a = g, \quad H_b = g, \quad R_b = 1 - v$ .

1.3. Запишем уравнения изгибающих моментов на участках 1 ( $\bar{M}_1$ ), 2 ( $\bar{M}_2$ ), 3 ( $\bar{M}_3$ ) и на участке 4 ( $\bar{M}_4$ ).

$$\begin{aligned}\bar{M}_1 &= R_a(l-x) - H_a \cdot y = \\ &= t(l-x) - c \frac{4f \cdot x \cdot (l-x)}{l^2}; \\ \bar{M}_2 &= (1-t) \cdot x - c \cdot \frac{4f \cdot x \cdot (l-x)}{l^2}; \\ \bar{M}_3 &= v(l-x) - g \left( \frac{4f \cdot x \cdot (l-x)}{l^2} \right); \\ \bar{M}_4 &= (1-v) \cdot x - g \left( \frac{4f \cdot x \cdot (l-x)}{l^2} \right).\end{aligned}$$

2. Выведем уравнения для случая, когда единичная сила  $P_n = 1$  находится между точками  $k$  и  $A$  для сечения с координатой  $v \leq x \leq l$ .

В этом случае (случай 1) для точки с координатой  $v \leq x \leq l$  значения моментов  $\bar{M}_k = \bar{M}_2$ ,  $\bar{M}_n = \bar{M}_4$ , а для любого сечения с координатой  $v \leq x \leq l-k$  значения моментов  $\bar{M}_k = \bar{M}_1$ ,  $\bar{M}_n = \bar{M}_4$ . Если абсцисса сечения находится в интервале  $l-k \leq x \leq l$ , значения моментов будут составлять  $\bar{M}_k = \bar{M}_1$ ,  $\bar{M}_n = \bar{M}_3$ .

2.1. Вертикальные перемещения сечения ( $k$ ) вычислим с помощью интеграла

Мора, учитывая лишь влияние изгибающих моментов. Влияние поперечных и продольных сил на искомое перемещение незначительно, что будет видно из сравнения наших результатов с данными, полученными при помощи программного комплекса LIRA.

Принимаем, что арка имеет постоянную жесткость при изгибе по всей длине. ( $EJ_0 = \text{const}$ ).

$$\begin{aligned}\delta_{kn}^1 &= \int_0^b \frac{\bar{M}_k \cdot \bar{M}_n}{EJ_0} \cdot dx + \int_k^a \frac{\bar{M}_k \cdot \bar{M}_n}{EJ_0} \cdot dx + \\ &+ \int_m^l \frac{\bar{M}_k \cdot \bar{M}_n}{EJ_0} \cdot dx = \int_0^b \frac{\bar{M}_2 \cdot \bar{M}_4}{EJ_0} \cdot dx + \\ &+ \int_k^a \frac{\bar{M}_1 \cdot \bar{M}_4}{EJ_0} \cdot dx + \int_m^l \frac{\bar{M}_1 \cdot \bar{M}_3}{EJ_0} \cdot dx.\end{aligned}$$

Вычислим почленно три интеграла и просуммируем их, получив окончательно величину  $\delta_{kn}^1$  для случая, когда сила  $P_n = 1$  находится в пределах от опоры  $A$  до сечения  $k$ .

В конечном итоге для первого случая, когда  $P_n = 1$  находится между точками  $A$  и  $k$ , получим выражение (1).

$$\begin{aligned}\delta_{kn}^1 &= \int_0^b \frac{\bar{M}_k \cdot \bar{M}_n}{EJ_0} \cdot dx + \int_k^a \frac{\bar{M}_k \cdot \bar{M}_n}{EJ_0} \cdot dx + \int_m^l \frac{\bar{M}_k \cdot \bar{M}_n}{EJ_0} \cdot dx = \\ &= \frac{1}{EJ_0} \cdot \left[ \frac{b^3}{3} \left( 1-v - \frac{4gv}{l} + \frac{4gf}{l^2} - t + tv + \frac{4gtf}{l} - \frac{4cf}{l} + \frac{4cvf}{l} + \frac{16cgf^2}{l^2} \right) + \right. \\ &+ \frac{b^4}{4} \left( \frac{4cf}{l^2} - \frac{4cvf}{l^2} - \frac{16cf}{l^3} - \frac{4gft}{l^2} - \frac{cgf^2}{l^3} \right) + \frac{b^5}{5} \left( \frac{16cgf^2}{l^4} \right) \left. \right] + \\ &+ \frac{1}{EJ_0} \cdot \left[ \frac{(a^2 - k^2)}{2} \cdot \left( tk - \frac{4fck}{l} \right) + \frac{a^3 - k^3}{3} \left( tv - \frac{4gtf}{l} - \frac{4fcv}{l} + \frac{16f^2gc}{l^2} - t + \frac{4fc}{l} + \frac{4fck}{l^2} \right) \right. \\ &+ \frac{a^4 - k^4}{4} \left( \frac{4ftg}{l^2} - \frac{16f^2gc}{l^3} + \frac{4fcv}{l^2} - \frac{16f^2gc}{l^3} - \frac{4fc}{l^2} \right) + \frac{a^5 - k^5}{5} \left( \frac{16f^2gc}{l^4} \right) \left. \right] + \\ &+ \frac{1}{EJ_0} \cdot \left[ \frac{k^3}{3} \left( vt - \frac{4gft}{l} - \frac{4fcv}{l} + \frac{16f^2cg}{l^2} \right) + \frac{k^4}{4} \left( \frac{4fgt}{l^2} - \frac{16f^2cg}{l^3} + \frac{4fcv}{l^2} - \frac{16f^2gc}{l^3} \right) \right. \\ &+ \left. \frac{k^5}{5} \left( \frac{16f^2cg}{l^4} \right) \right] \quad (1)\end{aligned}$$

3. Рассмотрим случай, когда сила  $P_n$  находится правее сечения  $k$ , но левее ключевого шарнира  $C$  ( $l/2 \leq x \leq m$ ).

Значения опорных реакций останутся теми же.

$$H_a = c, \text{ здесь } c = \frac{l-b}{2f}; \quad R_a = \frac{b}{l} = t;$$

$$R_b = (1-t).$$

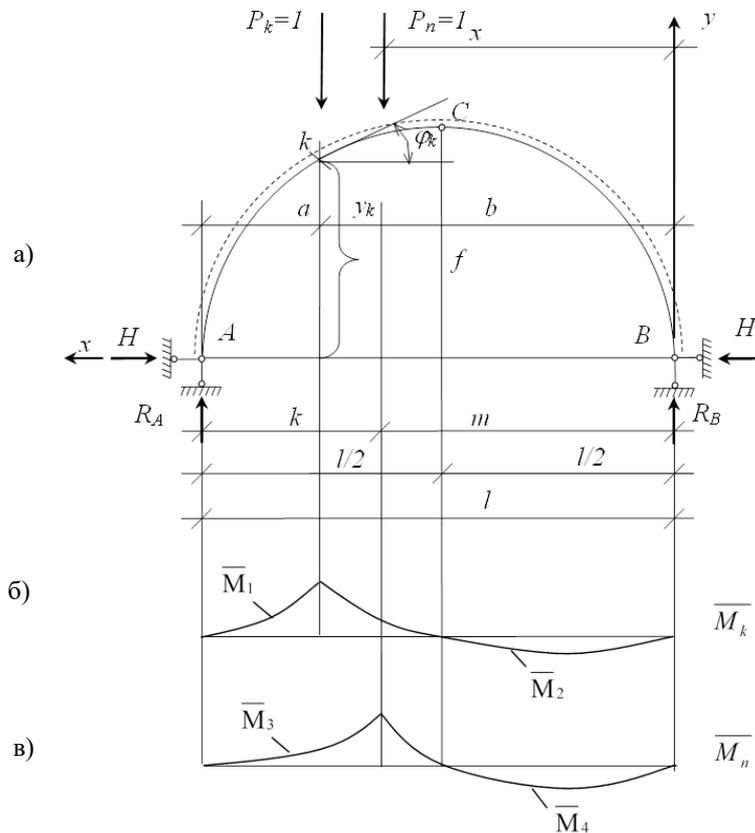


Рис. 2. Исходная расчетная схема трехшарнирной арки для определения усилий при  $l/2 \leq x \leq b$  (а); эпюра моментов  $\bar{M}_k$  от действия единичной силы  $P_k = 1$ , приложенной в сечении  $k$  (б); эпюра моментов  $\bar{M}_n$  от действия единичной силы  $P_n = 1$ , приложенной в произвольном сечении  $n$  (в)

Fig. 2. The initial design scheme of a three-hinged arch for determining the forces at  $l/2 \leq x \leq b$  (a); the plot of moments from the action of a single force  $P_k = 1$  applied in section  $k$  (b); the plot of moments from the action of a single force  $P_n = 1$  applied in an arbitrary section  $n$  (c)

Поменяются лишь пределы интегрирования и произведения выражений моментов в интеграле Мора.

Выведем уравнения для случая, когда единичная сила  $P_n = 1$  находится между точками  $k$  и  $C$  для точки с координатой  $l/2 \leq x \leq b$ .

В этом случае (случай 2) для сечения с координатой  $b \leq x \leq l$  значения моментов  $\bar{M}_k = \bar{M}_2$ ,  $\bar{M}_n = \bar{M}_4$ . Для сечения с координатой  $b \leq x \leq l-k$  значения

моментов  $\bar{M}_k = \bar{M}_1$ ,  $\bar{M}_n = \bar{M}_4$ . Для точки с координатой  $l-k \leq x \leq l$  значения моментов будут составлять  $\bar{M}_k = \bar{M}_1$ ,  $\bar{M}_n = \bar{M}_3$ .

3.1. Для определения вертикальных перемещений сечения ( $k$ ) снова воспользуемся интегралом Мора, учитывая лишь влияние изгибающих моментов (влияние поперечных и продольных сил на искомое перемещение незначительно,

что также будет видно из сравнения помощи программного комплекса наших результатов с полученными при LIRA).

$$\delta_{kn}^2 = \int_0^m \frac{\overline{M}_k \cdot \overline{M}_n}{EJ_0} \cdot dx + \int_m^b \frac{\overline{M}_k \cdot \overline{M}_n}{EJ_0} \cdot dx + \int_b^l \frac{\overline{M}_k \cdot \overline{M}_n}{EJ_0} \cdot dx;$$

$$\delta_{kn}^2 = \int_0^m \frac{\overline{M}_2 \cdot \overline{M}_4}{EJ_0} \cdot dx + \int_k^a \frac{\overline{M}_1 \cdot \overline{M}_4}{EJ_0} \cdot dz + \int_0^a \frac{\overline{M}_1 \cdot \overline{M}_3}{EJ_0} \cdot dz.$$

Вычислим почленно три интеграла и просуммируем их, получив окончательно величину  $\delta_{kn}^2$ . В итоге для второго случая,

когда единичная сила  $P_n = 1$  находится в пределах от сечения  $k$  до ключевого шарнира  $C$  (см. рис. 2), получим выражение (2).

$$\delta_{kn}^2 = \int_0^m \frac{\overline{M}_k \cdot \overline{M}_n}{EJ_0} \cdot dx + \int_k^a \frac{\overline{M}_k \cdot \overline{M}_n}{EJ_0} \cdot dz + \int_0^a \frac{\overline{M}_k \cdot \overline{M}_n}{EJ_0} \cdot dz =$$

$$= \frac{1}{EJ_0} \left[ \frac{m^3}{3} \left( 1 - \nu - \frac{4gv}{l} + \frac{4gf}{l^2} - t + tv + \frac{4gtf}{l} - \frac{4cf}{l} + \frac{4cvf}{l} + \frac{16cgf^2}{l^2} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{m^4}{4} \left( \frac{4cf}{l^2} - \frac{4cvf}{l^2} - \frac{16cf}{l^3} - \frac{4gft}{l^2} - \frac{cgf^2}{l^3} \right) + \frac{m^5}{5} \left( \frac{16cgf^2}{l^4} \right) \right] +$$

$$\frac{1}{EJ_0} \cdot \left[ \frac{k^2 - a^2}{2} \left( av - \frac{4gaf}{l} \right) + \frac{k^3 - a^3}{3} \left( tv - \frac{4gtf}{l} - \frac{4fcv}{l} + \frac{16f^2gc}{l^2} - \nu + \right. \right. \tag{2}$$

$$\left. + \frac{4fg}{l} + \frac{4fga}{l^2} \right) + \frac{k^4 - a^4}{4} \left( \frac{4ftg}{l^2} - \frac{16f^2gc}{l^3} + \frac{4fcv}{l^2} - \frac{16f^2gc}{l^3} - \frac{4fg}{l^2} \right) + \frac{k^5 - a^5}{5} \left( \frac{16f^2gc}{l^4} \right) \right] +$$

$$\frac{1}{EJ_0} \cdot \left[ \frac{a^3}{3} \left( vt - \frac{4gft}{l} - \frac{4fcv}{l} + \frac{16f^2cg}{l^2} \right) + \frac{a^4}{4} \left( \frac{4fgt}{l^2} - \frac{16f^2cg}{l^3} + \frac{4cvf}{l^2} - \frac{16f^2gc}{l^3} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{a^5}{5} \left( \frac{16f^2cg}{l^4} \right) \right]$$

4. Рассмотрим случай, когда сила  $P_n$  находится правее ключевого шарнира  $C$  и левее опоры  $B$  ( $0 \leq x \leq \frac{l}{2}$ ).

$$H_a = c, \quad \text{здесь } c = \frac{l-b}{2f}; \quad R_a = \frac{b}{l} = t;$$

$$R_b = (1-t).$$

4.1. Опорные реакции от единичной силы  $P_k = 1$ , приложенной в точке определения вертикальных перемещений ( $k$ ), были вычислены в пункте 1.1:

4.2. Вычислим опорные реакции от единичной силы  $P_n = 1$ , расположенной на расстоянии  $x$  от правой опоры ( $0 \leq x \leq l/2$ ) (см. рис. 3):

$$\sum M_b = 0; \quad R_a \cdot l - P_n \cdot m = 0; \quad R_a = \frac{P_n \cdot m}{l} = \frac{m}{l};$$

$$\sum M_c = 0; \quad R_a \cdot \frac{l}{2} - H_a \cdot f = 0; \quad H_a = \frac{R_a \cdot l}{2f} = \frac{m}{l} \cdot \frac{l}{2f} = \frac{m}{2f} = H_a = H_b;$$

$$\sum M_c^{np} = 0, \quad -P_n(x-m) + R_b \cdot \frac{l}{2} - H_b \cdot f = 0; \quad R_b = \frac{H_b \cdot f + x - m}{l/2};$$

$$-P_n \cdot k + R_b \cdot l = 0; \quad R_b = \frac{k}{l} = \frac{l-m}{l} = 1 - \frac{m}{l}.$$

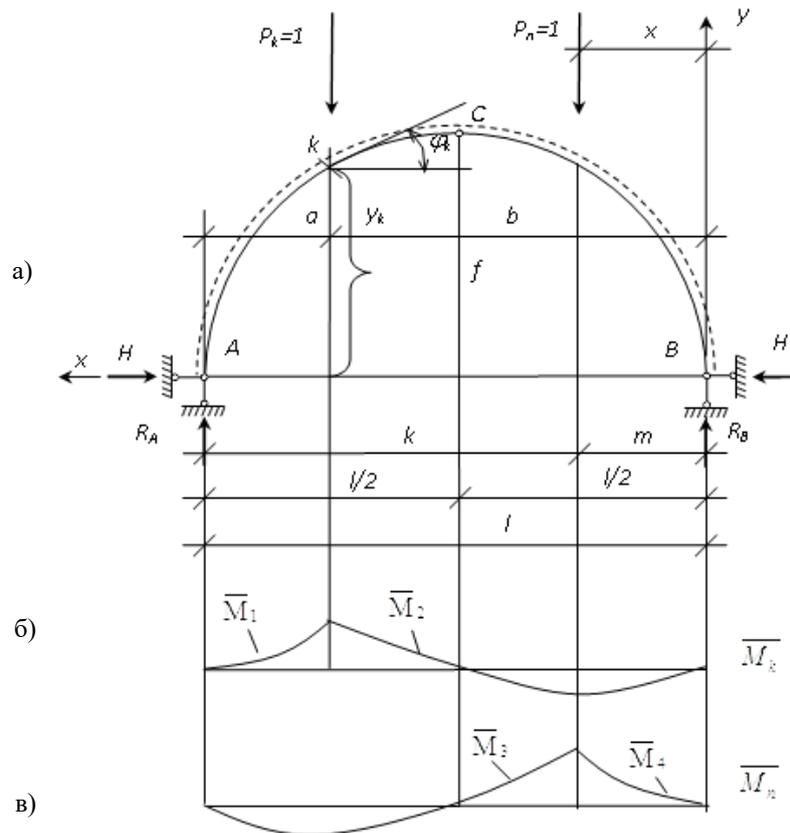


Рис. 3. Исходная расчетная схема трехшарнирной арки для определения усилий при  $0 \leq x \leq l/2$  (а); эпюра моментов  $\bar{M}_k$  от действия единичной силы  $P_k = 1$ , приложенной в сечении  $k$  (б); эпюра моментов  $\bar{M}_n$  от действия единичной силы  $P_n = 1$ , приложенной в произвольном сечении  $n$  (в)

Fig. 3. The initial calculation scheme of a three-hinged arch for determining forces at  $0 \leq x \leq l/2$  (a); the plot of moments from the action of a single force  $P_k = 1$  applied in section  $k$  (b); the plot of moments from the action of a single force  $P_n = 1$  applied in an arbitrary section  $n$  (c)

4.3. Запишем уравнения моментов (рис. 3) на участках 3 ( $\bar{M}_3$ ) и 4 ( $\bar{M}_4$ ):

$$\bar{M}_3 = R_a(l-x) - H_a \cdot y = \frac{m}{l}(l-x) - \frac{m}{2f} \left( \frac{4fx(l-x)}{l^2} \right) = \frac{m}{l}(l-x) - \frac{2mx(l-x)}{l^2};$$

$$\bar{M}_4 = R_b \cdot x - H_b \cdot y = \frac{k}{l} \cdot x - \frac{m}{2f} \cdot \frac{4fx(l-x)}{l^2} \quad \text{в пределах от нуля до } m;$$

$$\bar{M}_4 = R_b \cdot x - H_b \cdot y - P_n(x-m) = \frac{k}{l} \cdot x - \frac{m}{2f} \cdot \frac{4fx(l-x)}{l^2} - x + m \quad \text{в пределах от } m \text{ до } b.$$

4.4. Для определения перемещения сечения ( $k$ ) от действия единичной силы, приложенной в произвольном сечении ( $n$ ) на расстоянии  $x$  от правой опоры ( $0 \leq x \leq \frac{l}{2}$ ),

$$\delta^3_{kn} = \sum \int_0^l \frac{\overline{M}_k \overline{M}_n}{EJ_0} dx = \int_0^m \frac{\overline{M}_k \overline{M}_n}{EJ_0} dx + \int_m^b \frac{\overline{M}_k \overline{M}_n}{EJ_0} dx + \int_b^l \frac{\overline{M}_k \overline{M}_n}{EJ_0} dx.$$

Почленно проинтегрируем каждое слагаемое.

В итоге для третьего случая, когда

снова воспользуемся интегралом Мора.

Определим перемещения сечения ( $k$ ), проинтегрировав соответствующие выражения моментов:

единичная сила  $P_n = 1$  находится между ключевым шарниром  $C$  и опорой  $B$  (см. рис. 3), получим выражение (3).

$$\begin{aligned} \delta^3_{kn} &= \sum \int_0^l \frac{\overline{M}_k \overline{M}_n}{EJ_0} dx = \int_0^m \frac{\overline{M}_k \overline{M}_n}{EJ_0} dx + \int_m^b \frac{\overline{M}_k \overline{M}_n}{EJ_0} dx + \int_b^l \frac{\overline{M}_k \overline{M}_n}{EJ_0} dx = \\ &= \frac{1}{EJ_0} \cdot \left[ \frac{m^3}{3} \left( \frac{a(2m-k)}{l^2} \right) + \frac{x^4}{4} \left( \frac{2a(k-3m)}{l^3} \right) + \frac{4m^6}{5l^4} \right] + \frac{1}{EJ_0} \cdot \left[ \frac{b^3 - m^3}{3} \left( \frac{am}{l^2} + \frac{3am}{l^2} \right) + \right. \\ &+ \frac{b^4 - m^4}{4} \left( \frac{-6am}{l^3} - \frac{2am}{l^3} \right) - \frac{b^2 - m^2}{2} \cdot \frac{am}{l} + \frac{b^5 - m^5}{5} \cdot \frac{4am}{l^4} \left. \right] + \frac{1}{EJ_0} \cdot \left[ \left( \frac{a^3}{3} \cdot \frac{m(2a-b)}{l^2} + \right. \right. \\ &\left. \left. + \frac{a^4}{4} \left( \frac{2m(b-3a)}{l^3} \right) + \frac{4ama^5}{5l^4} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

### Выводы

Получены аналитические выражения для построения линии влияния перемещения произвольного сечения ( $k$ ) трехшарнирной арки при движении единичной силы в интервалах: в первом случае –  $0 \leq x \leq l$ ; во втором –  $l/2 \leq x \leq b$ ; в третьем случае –  $0 \leq x \leq l/2$ .

Проведенный численный анализ полученных результатов с помощью про-

граммного комплекса LIRA дает хороший итог.

Внедрение новой методики осуществляется при подготовке инженеров строительных специальностей в вузах, а также при проведении проверочных расчетов в работах по обследованию технического состояния строительных конструкций, при разработке способов восстановления их работоспособности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bresse. Cours de mecanique appliquee. 2-е изд. Париж, 1866. 536 с.
2. Winkler E. Die Lehre von der Elasticitat und Festigkeit. Prag, 1867. 388 с.
3. Кирсанов М. Н. Индуктивный метод решения статики и динамики стержневых систем // Международный форум информатизации. МФИ–2001. С. 163–166.
4. Кирсанов М. Н. Аналитический расчет, предельный и сравнительный анализ плоской балочной фермы // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. 2015. № 3(39). С. 86–93.
5. Dong Xiaomeng, Kirsanov M. N. The dependence of the deflection of the truss from the position of the load for an arbitrary number of panels // Вестник научных конференций. 2016. № 1-4(5). С. 6–7.
6. Бутенко Ю. И., Засяцько Н. А. Строительная механика: учеб. для вузов. Киев: Выща шк., 1989. 479 с.
7. Ежов Е. Ф., Мишин М. В. Построение линии влияния перемещений в сечении ( $K$ ) шарнирно-опертой, статически определимой балки // Актуальные вопросы строительства. Вторые Соломатовские чтения: материалы Всерос. науч.-техн. конф. Саранск: Изд-во Морд. ун-та, 2003. С. 277–281.
8. Киселев В. А. Расчет двухшарнирных арок с очертанием по веревочной кривой // Труды Мос-

ковского автомобильно-дорожного института. 1957. Вып. 20. С. 21-94.

9. Построение линии влияния в трехшарнирных арках / Е. Ф. Ежов, Ю. В. Юркин, В. Д. Антошкин, В. Е. Ежов // Современные технологии строительных материалов и конструкций: материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 150 летию со дня рождения

академика В.Г. Шухова. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2003. С. 160-164.

10. Построение линий влияния в трехшарнирных арках для решения актуальных практических задач / Е. Ф. Ежов, Ю. В. Юркин, В. Д. Антошкин, М. В. Мишин // Вестник Мордовского университета: научно-публицистический журнал. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2003. № 3-4. С. 139-144.

Статья поступила в редакцию 31.05.2024; одобрена после рецензирования 07.06.2024; принята к публикации 23.06.2024

### Информация об авторах

*БИКБАЕВ Ринат Арифович* – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной механики Института архитектуры и строительства, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, г. Саранск. Сфера научных интересов связана с проблемами обеспечения безопасности эксплуатации зданий и сооружений. Автор более 100 научных и учебно-методических трудов. E-mail: bikbaevra@yandex.ru

*ЕЖОВ Егор Федорович* – кандидат технических наук, доцент, пенсионер, г. Саранск. Сфера научных интересов – статические и динамические осадки сооружений. Автор более 100 научных и учебно-методических трудов. E-mail: eef1950@mail.ru

**Вклад авторов:** авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

---

Scientific article

UDC 624.041.63

DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.66>

EDN: MDWCVE

### Development of the theoretical model to construct the lines of influence of vertical displacements in a three-hinged arch section

*R. A. Bikbaev\*, E. F. Ezhov*

National Research Mordovia State University (Saransk)

bikbaevra@yandex.ru\*

**Abstract. Introduction.** The paper considers theoretical methods for calculating three-hinged arches. Methods for determining and building influence lines for core systems are described, along with their historical background. Literature review on this issue has revealed the benefits and drawbacks of current methods and approaches for building three-hinged arches' lines of influence. The authors' advances in theory and practice allow for the elimination of the drawbacks associated with existing approaches.

*The aim of the research* is to develop theoretical methods for calculating three-hinged arches. The analysis arch calculation sources reveals a lack of data regarding the lines of influence affecting the movements of the arches' cross sections.

*Research results.* It is possible to develop a line of influence for the displacements of each section  $k$  of a three-hinged arch under the influence of a single moving force using mathematical computations. The fundamental guidelines of this methodology are outlined, along with relevant equations that help develop influencing paths. It is possible to compute three-hinged arches using the derived analytical equations.

*Conclusion.* Reliable findings are produced from the numerical analysis of the data acquired with the LIRA software package. This approach is used in the training of construction engineers when they study structural mechanics and in the verification calculations made when assessing the technical state of building structures and devising strategies to make them operational again.

**Keywords:** line influence; move; fully articulated arch support reaction; equation; bending moment; Maura integral; hinge; a single force; transverse force; longitudinal force.

**Funding:** this research received no external funding.

---

**For citation:** Bikbaev R. A., Ezhov E. F. Development of the theoretical model to construct the lines of influence of vertical displacements in a three-hinged arch section. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies.* 2024;(1):66–75. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.66>; EDN: MDWCVE

---

#### REFERENCES

1. Bresse. Cours de mecanique appliquee. 2nd ed. Paris; 1866. 536 p.
2. Winkler E., Die Lehre von der Elasticitat und Festigkeit. Prag; 1867. 388 p.
3. Kirsanov M. N. Inductive method for solving statics and dynamics of core systems. International informatization forum. MFI–2001. P. 163-166. (In Russ.).
4. Kirsanov M. N. Analytical calculation, marginal and comparative analysis of flat girder trusses. *Scientific Bulletin of Voronezh State Agrarian Academy of Management Systems. Construction and architecture.* 2015;(3):86-93. (In Russ.).
5. Dong Xiaomeng, Kirsanov M. N. Annotation of the number of panels. *Bulletin of scientific conferences.* 2016;(1-4):6-7.
6. Butenko Y. I., Zasyatko N. A. Construction mechanics: proc. for high schools. Kiev: Publishing Vyshcha School; 1989. 479 p. (In Russ.).
7. Ezhov E. F., Mishin M. V. Construction of the line of influence of displacements in the section (K) of a hinged-supported, statically determinate beam. *Actual Issues of Construction. Second Solomat Readings: Materials Vseros. scientific-techn. conf.* Saransk: Publishing house of the Mordovian University; 2003. P. 277-281. (In Russ.).
8. Kiselev V. A. Calculation of double-hinged arches with an outline along a rope curve. *Proceedings of the Moscow Automobile and Road Institute.* 1957;issue 20:21-94. (In Russ.).
9. Ezhov E. F., Yurkin Y. V., Antoshkin V. D., Ezhov V. E. Construction of the influence line in the three-hinged arches. *Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference, dedicated to the 150th anniversary of the birth of Academician V.G. Shukhov. Modern technologies of building materials and structures.* Saransk: Publishing house of the Mordovian University; 2003. P. 160-164. (In Russ.).
10. Ezhov E. F., Yurkin Y. V., Antoshkin V. D., Mishin M. V. Construction of influence lines in three-hinged arches for solving actual practical problems. *Bulletin of the Mordovian University. Scientific journalistic journal. Saransk. Publishing house of the Mordovian University.* 2003;(3-4):139-144. (In Russ.).

The manuscript was submitted on 15.05.2024; reviewed on 30.05.2024; adopted for publication on 03.06.2024

#### Information about the authors

**BIKBAEV Rinat Arifovich** – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mechanics of the Institute of Architecture and Construction, National Research Mordovia State University, Saransk. Research interests – safety of operation of buildings and structures. Author of more than 100 publications. E-mail: [bikbaevra@yandex.ru](mailto:bikbaevra@yandex.ru)

**EZHOV Egor Fedorovich** – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, retired, Saransk. Research interests – static and dynamic precipitation of structures. Author of more than 100 publications. E-mail: [eef1950@mail.ru](mailto:eef1950@mail.ru)

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this paper.

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest.

The authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

# ТЕХНОЛОГИИ

Научная статья

УДК 628.3:675

DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.76>

EDN: NIJXIJ

## Разработка эффективной технологии очистки сточных вод кожевенных предприятий

Д. Лассана<sup>✉</sup>, В. Н. Саинова

Астраханский государственный технический университет (г. Астрахань)

[lassanakarifo@gmail.com](mailto:lassanakarifo@gmail.com)<sup>✉</sup>

**Аннотация.** *Введение.* Очистка сточных вод кожевенной промышленности представляет собой сложную задачу из-за присутствия в них как органических, так и неорганических веществ.

*Цель работы* – оценить эффективность технологии, сочетающей физико-химический (адсорбция) и биологический (в аэротенке) методы очистки, с точки зрения потенциала снижения содержания загрязняющих веществ в сточных водах кожевенных заводов с сохранением при этом качества воды и обеспечением устойчивого управления природными ресурсами. Для достижения цели поставлены следующие задачи: изучить перспективную технологию очистки сточных вод кожевенных заводов, определить оптимальные параметры процессов физико-химической и биологической очистки.

*Методы и материалы.* Технология была исследована на реальных сточных водах кожевенного завода. Эксперименты осуществлялись в лабораторных условиях в Астраханском государственном техническом университете. Процесс адсорбции ионов хрома проводили на овощных отходах (картофельной кожуре) с исходной концентрацией хрома в сточной воде 37,5 мг/л при следующих условиях: pH = 2,5; время контакта воды с адсорбентом 1 час; скорость вращения мешалки 300 оборотов в минуту.

*Результаты.* С увеличением дозы адсорбента скорость удаления ионов хрома возрастает до определенного порогового значения. Эффективность удаления ионов хрома повышается с 44 до 99,93 % при изменении дозы адсорбента от 0,5 до 8 г. Сточная вода после физико-химической очистки подвергалась биологической очистке в аэротенке. Эффективность биологической очистки контролировали по ряду показателей: концентрации загрязнений в исходной и в очищенной воде по БПК<sub>5</sub>, расходу воздуха, концентрации активного ила, концентрации растворенного кислорода. Результаты показали, что максимальная скорость окисления составляет 87,53 (мг субстрата на 1 г ила в час); оптимальными параметрами процесса являются доза ила 3,5 г/л, продолжительность аэрации 6 часов, концентрация кислорода 4 мг/л.

*Выводы.* В результате проведенных исследований выяснилось, что применение эффективной технологии очистки сточных вод кожевенного завода позволит достичь глубокой очистки до требований, соответствующих стандартам сбросов. Оптимальными параметрами процесса физико-химической очистки являются продолжительность перемешивания 1 час, скорость вращения мешалки 300 об/мин, доза адсорбента 5 г. Оптимальные параметры процесса биологической очистки следующие: продолжительность аэрации 6 часов; доза активного ила 3,5 г/л; концентрация растворенного кислорода 4 мг/л. Эффективность удаления ионов хрома физико-химическим процессом (адсорбцией) составляет 99,93 %; эффективная скорость окисления, полученная в ходе биологической очистки, 87,53 мг субстрата на 1 г ила в час. Данная технология эффективна для очистки сточных вод кожевенной промышленности с целью сохранения окружающей среды от негативного воздействия этой отрасли.

**Ключевые слова:** сточные воды; адсорбция; адсорбент; активный ил; хром; БПК<sub>5</sub>; аэротенк.

**Финансирование:** авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

---

**Для цитирования:** Лассана Д., Саинова В. Н. Разработка эффективной технологии очистки сточных вод кожевенных предприятий // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2024. № 1 (29). С. 76–85. DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.76>; EDN: NIJXIJ

---

## Введение

Кожевенная промышленность успешно развивается во многих странах мира: Китае, России, Италии, Турции, Индии, Франции, Марокко, Алжире, Гане, Эфиопии и т. д., однако при производстве кожи образуется большое количество сточных вод, содержащих вещества, вредные для окружающей среды и здоровья человека.

В кожевенной промышленности вода и химикаты используются практически на всех этапах – от подготовки до получения конечного продукта, то есть кожи. Расход воды на тонну свежих шкур составляет от 25 до 60 м<sup>3</sup>, а выход – 500 килограммов готовой кожи. В результате производства каждого килограмма обработанных шкур образуется 30 литров сточных вод [1]. При хромовом дублении используются различные химические вещества, такие как гидроксид натрия, гипохлорит натрия, дихромат калия, сульфат хрома, известь, хлориды, серная кислота, муравьиная кислота, поверхностно-активные вещества, сульфид натрия, соли натрия и аммония и т. д. [2], которые могут быть токсичными и вредными для окружающей среды, если их не удалить из сточных вод.

Дубление кожи с применением хрома остается наиболее распространенным способом благодаря не только скорости технологических процессов, но и получению готового продукта (кожи) более однородного и стойкого. Это экономичнее, чем использование других методов. Однако при дублении кожи образуются отходы, которые включают в себя такие соедине-

ния, как фенол, сульфиды, хлориды, ионы хрома и формальдегид [3, 4], которые содержатся в воде, образующейся в результате технологических процессов.

Ионы хрома, особенно его шестивалентная форма, являются чрезвычайно токсичными, высококанцерогенными и мутагенными для живых организмов. Поэтому хром считается более опасным, чем другие тяжелые металлы [5, 6]. Хром и сульфиды – наиболее проблемные загрязняющие вещества в сточных водах кожевенной промышленности, относящихся к третьей группе промышленных сточных вод, поскольку содержат как минеральные, так и органические вещества [7]. Поэтому они представляют собой серьезную экологическую проблему. Это наблюдение побудило экспертов в области охраны окружающей среды потребовать, чтобы промышленники этого сектора обеспечили глубокую очистку этой воды перед ее сбросом в соответствии с требованиями. Однако сложный химический состав и большое количество загрязняющих компонентов, содержащихся в сточных водах кожевенных производств, существенно усложняют процесс очистки [8].

Из многочисленных способов очистки сточных вод всё чаще преимущество отдается безотходным технологиям производства и системам с замкнутым циклом водоснабжения [9]. Большинство существующих методов очистки сточных вод кожевенных предприятий характеризуется высокой стоимостью реагентов и недостаточностью ожидаемых результатов. Этим

вызвана необходимость разработки эффективных технологий очистки сточных вод, позволяющих минимизировать их негативное воздействие.

Альтернативой традиционной очистке сточных вод кожевенного производства является применение очистки адсорбцией ионов хрома на овощных отходах с последующей биологической очисткой активным илом. Сочетание этих двух методов имеет большое экономическое и экологическое преимущество по сравнению с методами с использованием химических реагентов.

Адсорбция является наиболее эффективным методом, широко используемым для удаления хрома из промышленных вод [10]. Удаление ионов хрома путем адсорбции на адсорбентах из кожуры фруктов или овощей остается эффективным и действенным методом [11], поскольку он снижает концентрацию ионов хрома ниже установленных норм.

Биологическая очистка активным илом сточных вод кожевенных заводов с незначительным содержанием ионов хрома снижает концентрацию параметров загрязнения до значений, соответствующих допустимым нормам сброса. Технология, сочетающая эти два вышеперечисленных метода, выгодна вдвойне, поскольку, с одной стороны, снижается стоимость, а с другой – она является экологичной из-за уменьшения негативного воздействия на биологическую и физическую среду.

**Основной задачей исследований** являлось изучение перспективной технологии очистки сточных вод кожевенных заводов. **Цель исследований** – оценить эффективность этой технологии, подобрать оптимальные параметры процесса.

Новизна исследований заключается в том, что впервые был исследован процесс адсорбции ионов хрома на овощных отходах (картофельной кожуре) с реальными стоками кожевенной промышленности, а также в применении для очистки этих стоков одновременно процессов физико-химической и биологической очистки.

### Методы и материалы исследования

Исследования проводили с реальными сточными водами кожевенного завода.

В качестве адсорбента использовали кожуру картофеля. Кожура картофеля была отобрана в ресторане города Астрахани. Её промывали водопроводной водой для удаления грязи и примесей, затем замачивали в дистиллированной воде на несколько часов. Чистую кожуру высушивали на солнце в течение 24 часов, а затем помещали в печь при температуре 75 °С до полного высыхания. Высушенную кожуру измельчали, затем просеивали через ряд сит размером 1; 0,50; 0,25 и 0,125 мм. Для проведения испытаний по адсорбции была выбрана фракция порошка картофельной кожуры, прошедшая через сито размером 0,125 мм.

Испытания проводились в прерывистом режиме в стаканах ёмкостью 250 мл каждый. 100 мл пробы сточных вод кожевенного завода, содержащей начальную концентрацию ионов хрома 37,5 мг/л, были помещены соответственно в десять различных ёмкостей.

В каждую ёмкость добавляли разные дозы адсорбента. Все они обрабатывались при температуре окружающей среды и pH = 2,5. Стаканы помещали на многостанционную магнитную мешалку на 1 час при скорости вращения 300 об/мин. После встряхивания суспензии адсорбента из разных ёмкостей пробу фильтровали через бумажный фильтр. Фильтрат из каждого флакона анализировали на определение остаточной концентрации ионов хрома [12]. Определение ионов хрома проводили методом атомно-абсорбционной спектrophотометрии с пламенным распылением.

Адсорбционную способность кожуры картофеля рассчитывали по уравнению

$$Q_e = \frac{C_i - C_f}{m} \cdot V, \text{ мг/л}, \quad (1)$$

где  $V$  – объем сточных вод, содержащих ионы хрома, л;

$C_i$  – исходная концентрация ионов  $Cr$  до адсорбции, мг/л;

$C_f$  – концентрация ионов  $Cr$  после адсорбции, мг/л;

$m$  – масса адсорбента, г.

Сточная вода после физико-

химической очистки (адсорбция) подвергалась биологической очистке на лабораторной установке, состоящей из аэротенков первой и второй ступени и илоотделителей. Схема установки представлена на рисунке.

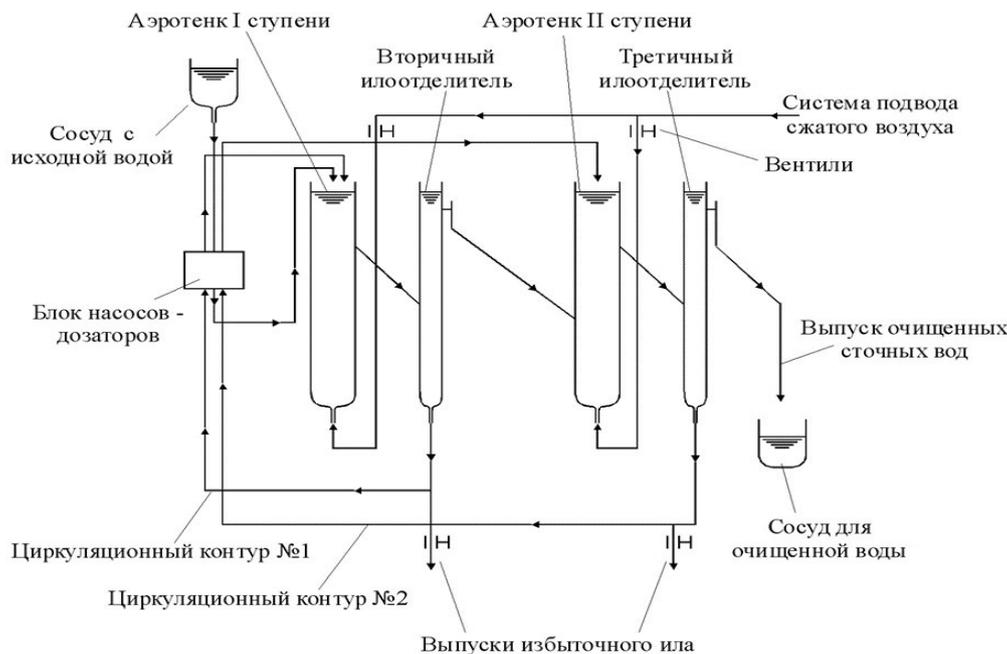


Схема двухступенчатой лабораторной установки  
The scheme of a two-stage laboratory installation

Установка работала так же, как и использованная Е. В. Скосыревой в исследованиях процесса очистки сточных вод кондитерских предприятий [13]. Очищенные сточные воды затем отбирались и анализировались для определения концентрации остаточных загрязнений в пересчете на БПК<sub>5</sub> с целью оценки эффективности работы технологической системы. Продолжительность каждого опыта варьировалась от одной до двух недель.

В ходе эксперимента концентрацию загрязнений в сточной  $S_0$  и очищенной воде  $S_T$ , мг/л, контролировали по БПК<sub>5</sub> один раз в 5-7 суток. Расход сточных вод  $Q$ , л/ч, измеряли один раз в час, расход воздуха  $Q_{вз}$ , л/ч, – один раз в сутки. Концентрацию активного ила  $X_0$ , г/л, определяли химическим анализом один раз в

сутки; концентрацию растворенного кислорода  $CO_2$ , мг/л, – один раз в час; иловый индекс  $I$ , см<sup>3</sup>/г, – один раз в сутки; концентрацию активного ила в очищенной воде  $X_0$ , мг/л, – один раз в сутки. Величину рН в аэротенке определяли по показаниям рН-метра один раз в час.

Величину удельной скорости очистки  $\rho$ , мг субстрата на 1 г ила в час, рассчитывали по формуле

$$\rho = \frac{S_0 - S_T}{X_0 \cdot (1 - Z) \cdot T_a} \quad (2)$$

Для поддержания концентрации активного ила в заданных пределах из аэротенка удаляли избыточный ил, количество которого определяли по формуле

$$W_{изб} = \frac{(X_{O2} - X_{O1}) \cdot W_A}{X_{O2}} \quad (3)$$

где  $W_A$  – объем аэротенка, л;

$X_{O1}$  и  $X_{O2}$  – концентрация ила за предыдущие и текущие сутки соответственно, г/л.

Зольность ила  $Z$ , доли единиц, определяли химическим анализом один раз в 5-7 дней. Период аэрации  $T_A$ , ч, определяли один раз в час по формуле

$$T_A = \frac{W_A}{Q}. \quad (4)$$

Степень рециркуляции ила  $R_{ц}$  задавалась по формуле

$$R_{ц} = \frac{X_o \cdot 100}{1000 / (1 - X_o)}. \quad (5)$$

Температуру воды  $T$ , °С, измеряли по показанию термометра один раз в час.

#### Результаты и их обсуждение

**Физико-химическая очистка.** Степень удаления хрома в процессе адсорбции представлена в таблице 1.

Таблица 1. Степень удаления хрома в процессе адсорбции с использованием кожуры картофеля  
Table 1. The degree of chromium removal during the adsorption process using potato peel

Количество используемого адсорбента, г	Концентрация хрома в очищенной воде, мг/л	Адсорбционная способность, мг/г	Процент удаления хрома, %
0,5	21	3,3	44
1	17	2,05	54,666
2	12,44	1,253	66,826
3	9,53	0,932	74,586
4	4,75	0,818	87,333
5	0,025	0,749	99,933
6	0,025	0,624	99,333
7	0,025	0,535	99,333
8	0,025	0,468	99,333

В результате исследования процесса адсорбции ионов хрома из сточных вод кожевального завода выяснилось, что эффективность удаления ионов хрома повышается с увеличением дозы адсорбента в растворе до тех пор, пока она не станет постоянной (т.е. оптимальная степень удаления 99,93 %) примерно при 5 г адсорбента. Это объясняется большей доступностью адсорбционных центров адсорбента и тем самым облегчением проникновения ионов хрома к адсорбционным центрам [14]. Аналогичные результаты были получены при адсорбции ионов хрома на золе в псевдооживленном слое [15].

Обработка сточных вод кожевального производства путем адсорбции на картофельных очистках показала оптимальную адсорбционную способность последних по ионам хрома, оцениваемую в 3,3 мг/г. Этот результат аналогичен полученному для рисовой соломы [16]. Однако процесс адсорбции не может снизить уровень

всех загрязняющих веществ в сточных водах до допустимых стандартов сброса. Принимая во внимание наличие других загрязняющих веществ, считаем необходимой и целесообразной очистку сложных стоков кожевального завода путем сочетания двух процессов, а именно физико-химической и биологической очистки, для устранения всех видов загрязнения в соответствии с требованиями к сбросу.

**Биологическая очистка.** Результаты исследований процесса биологической очистки сточных вод представлены в таблице 2.

Эффективность процесса удаления загрязнений по БПК<sub>5</sub> исследовали при продолжительности аэрации 6, 10 и 12 часов, концентрации кислорода 1, 2, 4 мг/л и дозе ила 3; 3,5; 4; 5 г/л. Полученные результаты выявили влияние некоторых параметров на изменение скорости очистки от загрязнений, а именно: дозы ила, времени аэрации и концентрации кислорода.

Таблица 2. Параметры очистки сточных вод кожевенного завода в двухступенчатой системе «аэротенк–отстойник» (вторая ступень)

Table 2. Parameters of wastewater treatment of a tannery in a two-stage system "aerotank-sump" (second stage)

№ опытов	Регулирующие параметры						Контролируемые параметры				
	$T_A$ , ч	$X_0$ , г/л	$C_{O_2}$ , мг/л	$S_0$ , мг/л	$Q$ , л/ч	$T$ , °C	$S_T$ , мг/л	$I$ , см <sup>3</sup> /г	$Z$ , доли ед.	pH	$\rho$ , мг/г·ч
1	6	4	4	1800,79	1	21	130	100	0,122	6,2	79,28
2	6	3,5	4	1705,29	1	23	128	57,14	0,142	6,3	87,53
3	12	5	4	1825,33	1	22	131,5	80	0,169	6,2	33,97
4	12	3,5	4	1976,73	1	20	135	51,42	0,265	6,2	59,66
5	10	3,5	4	1957,56	1	19	132,78	57,14	0,139	6,4	60,55
6	10	3,5	2	1810,77	1	18	131	71,42	0,291	6,5	67,69
7	6	5	4	1832,37	1	21,5	132	28,57	0,195	6,3	70,40
8	12	4	4	2053,78	1	21	138	100	0,156	6,5	47,28
9	6	5	4	2067,32	1	22,5	140	120	0,199	6,2	80,20
10	10	3	1	2087,92	1	20	155	66,66	0,159	6,2	76,61

Условные обозначения:  $T_A$ , ч, – период аэрации;  $X_0$ , г/л, – концентрация активного ила;  $C_{O_2}$ , мг/л, – концентрация растворенного кислорода;  $S_0$ , мг/л, – концентрация загрязнений в сточной воде (БПК<sub>5</sub>);  $Q$ , л/ч, – расход сточных вод;  $T$ , °C, – температура воды;  $S_T$ , мг/л, – концентрация загрязнений в очищенной воде (БПК<sub>5</sub>);  $I$ , см<sup>3</sup>/г, – иловый индекс;  $\rho$ , мг/г·ч, – удельная скорость очистки; pH – концентрация ионов водорода;  $Z$ , доли единиц, – зольность активного ила.

Скорость очистки от загрязнений повышается с увеличением периода аэрации в аэротенке, как показано в таблице 2.

Анализ результатов показал, что эффективное удаление загрязнений (скорость окисления 87,53 мг субстрата на 1 г ила в час) было достигнуто при дозе активного ила 3,5 г/л и 6-часовом периоде аэрации. Этот эффект аналогичен эффекту, полученному С. Хайдаром и соавторами в среднеконцентрированных сточных водах кожевенного завода [17].

Полученные результаты показывают, что обработка сточных вод активным илом дает лучший эффект очистки при средних нагрузках субстрата (БПК<sub>5</sub>).

Наличие небольших концентраций ионов хрома в фильтрате не препятствует деятельности микроорганизмов активного ила. Это подтверждается выводами некоторых исследований, проведенных, например, М. Ахмедом и соавторами (очистка сточных вод кожевенных заводов методом активного ила в лабораторном масштабе в непрерывном режиме в 2014 г.) [18], в ходе

которых был получен эффект удаления ионов хрома 98,8 %. Подобные результаты объясняются тем, что некоторые бактерии устойчивы к низким концентрациям ионов хрома в сточных водах.

### Выводы

В результате проведенных исследований по разработке эффективной технологии очистки сточных вод кожевенного завода выяснилось, что применение данной технологии позволит достичь глубокой очистки до требований, соответствующих стандартам сбросов.

Оптимальными параметрами процесса физико-химической очистки являются продолжительность перемешивания 1 час, скорость вращения мешалки 300 об/мин, доза адсорбента 5 г. Оптимальные параметры процесса биологической очистки следующие: продолжительность аэрации 6 часов; доза активного ила 3,5 г/л; концентрация растворенного кислорода 4 мг/л.

Эффективность удаления ионов хрома физико-химическим процессом (адсорбцией) составляет 99,93 %; эффективная

скорость окисления, полученная в ходе биологической очистки, 87,53 мг субстрата на 1 г ила в час.

С учетом полученных результатов можно сделать вывод о том, что данная

технология эффективна для очистки сточных вод кожевенной промышленности с целью сохранения окружающей среды от негативного воздействия этой отрасли.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Midha V., Dey A. Biological treatment of tannery wastewater for sulfide removal // *International Journal of Chemical Sciences*. 2008. Vol. 6(2). P. 472-486.
2. Les effluents de tannerie caractérisation et impact sur le milieu marin / M. A. Aboulhassan, S. Souabi, A. Yaacoubi, N. Zaim, F. Z. Bouthir // *Revue des sciences de l'eau*. 2008. Vol. 21(4). P. 463-473.
3. Biodegradation of gallotannins and ellagitannins / M. Li, Y. Kai, H. Qiang, J. Dongying // *Journal of basic microbiology*. 2006. Vol. 46(1). P. 68-84.
4. Hasegaven M. C., Barbosa A. M., Takashina K. Biotreatment of industrial tannery wastewater using *Biorhizobium rhodirium* // *Journal of Serbia Chemical Society*. 2010. Vol. 76. P. 1-8.
5. Toxicological profile for chromium / S. Wilbur, H. Abadin, M. Fay, D. Yu, B. Tencza, L. Ingerman, J. Klotzbach, S. James. Atlanta (GA): Agency for Toxic Substances and Disease Registry (US), 2012.
6. Babu B. V., Gupta S. Removal of Cr (VI) from wastewater using activated tamarind seeds as an adsorbent // *Journal of Environmental Engineering and Science*. 2008. Vol. 7(5). P. 553-557.
7. Лассана Д. Актуальные проблемы очистки сточных вод кожевенных заводов некоторых стран мира // Конкурс лучших студенческих работ: сборник статей XIII Международного научно-исследовательского конкурса. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2022. С. 71-76.
8. Андреева С. А. Повышение эффективности технологических процессов очистки от органических компонентов в высококонцентрированных сточных водах // *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2021. № 3(19). С. 77-88.
9. Очистка сточных вод с помощью УВМ и разработка конструкций сорбционных колонн / А. И. Сютова, С. Я. Алибеков, Н. П. Сютов, Н. Г. Крашенинникова, Е. В. Кутонова // *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2023. № 1. С. 35-42.
10. Hasany S. M., Ahmad R. The potential of cost-effective coconut husk for the removal of toxic metal ions for environmental protection // *Journal of environmental management*. 2006. Vol. 81(3). P. 286-295.
11. Gupta S., Babu B. V. Experimental investigations and theoretical modeling aspects in column studies for removal of Cr(VI) from aqueous solutions using activated tamarind seeds // *Journal of Water Resource and Protection*. 2010. Vol. 2(8). P. 706-716.
12. Mutongo F., Kuipa O., Kuipa P. K. Removal of Cr (VI) from aqueous solutions using powder of potato peelings as a low cost sorbent // *Bioinorganic chemistry and applications*. 2014. Vol. 2014. P. 973153.
13. Саинова В. Н. Новые технологии и режимы процессов очистки сточных вод пищевых производств: монография. Астрахань: Изд. Сорокин Роман Васильевич, 2011. 102 с.
14. Mohan D., Singh K. P., Singh V. K. Trivalent chromium removal from wastewater using low cost activated carbon derived from agricultural waste material and activated carbon fabric cloth // *Journal of hazardous materials*. 2006. Vol. 135(1-3). P. 280-295.
15. Potential of activated carbon from various sources as a low-cost adsorbent to remove heavy metals and synthetic dyes / Y. A. Neolaka, A. A. Riwu, U. O. Aigbe, K. E. Ukhurebor, R. B. Onyanacha, H. Darmokoesoemo, H. S. Kusuma // *Results in Chemistry*. 2022. Vol. 5. P. 100711.
16. Characterization of Cr(VI) removal from aqueous solutions by a surplus agricultural waste – Rice straw / H. Gao, Y. Liu, G. Zeng, W. Xu, T. Li, W. Xia // *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 150. P. 446-452.
17. Haydar S., Aziz J. A., Ahmad M. S. Biological treatment of tannery wastewater using activated sludge process // *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2007. Vol. 1. P. 61-66.
18. Elmagd A. M. A., Mahmoud M. S. Tannery wastewater treatment using activated sludge process system (lab scale modeling) // *International Journal of Engineering and Technical Research*. 2014. Vol. 2(5). P. 21-28.

Статья поступила в редакцию 31.01.2024; одобрена после рецензирования 28.03.2024; принята к публикации 31.05.2024

### Информация об авторах

*ЛАССАНА Диоп* – аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология», Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань. Область научных интересов – новые технологии очистки сточных вод. Автор 5 научных публикаций. E-mail: lassanakarifo@gmail.com

*САИНОВА Виктория Николаевна* – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология», Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань. Область научных интересов – новые технологии очистки сточных вод. Автор более 80 научных публикаций. E-mail: sainovav@yandex.ru

**Вклад авторов:** Лассана Диоп – проведение эксперимента, обработка и анализ экспериментальных данных, составление статьи; Саинова В. Н. – концепция работы, корректировка статьи.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

---

Scientific article

UDC 628.3:675

DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.76>

EDN: NIJXIJ

### Development of an effective technology for wastewater treatment at tannery enterprises

*D. Lassana*<sup>✉</sup>, *V. N. Sainova*

Astrakhan State Technical University (Astrakhan)

lassanakarifo@gmail.com<sup>✉</sup>

**Abstract.** *Introduction.* The presence of both organic and inorganic contaminants makes the purification of wastewater from the leather industry a challenging operation.

*The aim of the research* is to assess the effectiveness of a technology that combines physical-chemical methods (adsorption) with a biological approach (in an aerotank) for wastewater treatment, considering its potential to reduce the concentration of pollutants in the wastewater from leather factories, thus maintaining water quality and ensuring sustainability of natural resource management. The following research objectives were established in order to achieve the goal: to identify the ideal parameters for the physical-chemical and biological treatment processes; to investigate the potential technology of treating wastewater from tanneries.

*Materials and methods.* The technology was investigated using real wastewater from a leather factory. Experiments were conducted under laboratory conditions at Astrakhan State Technical University. The process of chromium ion adsorption was carried out using vegetable waste (potato peel) with an initial chromium concentration in the wastewater of 37.5 mg/L. The adsorption process was studied under the following conditions: pH = 2.5; contact time between water and the adsorbent was 1 hour, and the stirrer rotation speed was 300 revolutions per minute.

*Research results.* As the adsorbent dose increases, the removal rate of chromium ions increases to a certain threshold value. The removal efficiency of chromium ions increases from 44 to 99.93% when the adsorbent dose changes from 0.5 g to 8 g. In the aeration tank, wastewater undergoing physical and chemical treatment was then exposed to biological treatment. The efficiency of biological treatment was monitored by a number of indicators: concentration of contaminants in the initial and treated water by BOD<sub>5</sub>, air flow rate, activated sludge concentration, dissolved oxygen concentration. The results showed that the maximum oxidation rate is 87.53 (mg of substrate per 1 g of sludge per hour). The most optimal process parameters were 3.5 g/L of sludge, 6 hours of aeration, and 4 mg/L of oxygen.

*Conclusion.* As a result of the conducted research on the development of effective technology for wastewater treatment in tanneries, it was found that the application of this technology will allow to achieve deep purification to the requirements corresponding to the standards of discharges.

Optimal parameters of the process of physical and chemical purification are duration of stirring 1 hour, speed of rotation of the stirrer 300 r/min, adsorbent dose 5 g. Optimal parameters of the biological purification process are as follows: aeration duration 6 hours; activated sludge dose 3.5 g/l; dissolved oxygen concentration 4 mg/l. Efficiency of chromium ion removal by physical-chemical process (adsorption) is 99.93%; effective oxidation rate of chromium ions is 99.93%. This wastewater treatment method helps preserve the environment from the negative impact of leather manufacturing industry.

**Keywords:** wastewater; adsorption; adsorbent; activated sludge; chromium; BOD<sub>5</sub>; aeration tank.

**Funding:** this research received no external funding.

---

**For citation:** Lassana D., Sainova V. N. Development of an effective technology for wastewater treatment at tannery enterprises. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies.* 2024;(1):76–85. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.76>; EDN: NIJXIJ

---

#### REFERENCES

1. Midha V., Dey A. Biological treatment of tannery wastewater for sulfide removal. *International Journal of Chemical Sciences.* 2008;6(2):472-486.
2. Aboulhassan M. A., Souabi S., Yaacoubi A., Zaim N., Bouthir F. Z. Les effluents de tannerie caractérisation et impact sur le milieu marin. *Revue des sciences de l'eau.* 2008;21(4):463-473.
3. Li M., Kai Y., Qiang H., Dongying J. Biodegradation of gallotannins and ellagitannins. *Journal of basic microbiology.* 2006;46(1):68-84.
4. Hasegaven M. C., Barbosa A. M., Takashina K. Biotreatment of industrial tannery wastewater using bioryospharia rhodiria. *Journal of Serbia Chemical Society.* 2010;76:1-8.
5. Wilbur S., Abadin H., Fay M., Yu D., Tencza B., Ingerman L., Klotzbach J., James S. Toxicological profile for chromium. Atlanta (GA): Agency for Toxic Substances and Disease Registry (US), 2012.
6. Babu B. V., Gupta S. Removal of Cr (VI) from wastewater using activated tamarind seeds as an adsorbent. *Journal of Environmental Engineering and Science.* 2008;7(5):553-557.
7. Lassana D. Current problems of wastewater treatment from tanneries in some countries of the world. *Academic contest for the best student paper: collection of articles of the XIII International Research Contest.* Penza: MCNS Nauka i Prosveshhenie; 2022. P. 71-76. (In Russ.).
8. Andreeva S. A. Improving the efficiency of technological processes of purification from organic components in highly concentrated wastewater. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies.* 2021;(3):77-88. (In Russ.).
9. Sjutova A. I., Alibekov S. Ja., Sjutov N. P., Krashennnikova N. G., Kutonova E. V. Wastewater treatment with cfm and sorption columns design. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies.* 2023;(1):35-42. (In Russ.).
10. Hasany S. M., Ahmad R. The potential of cost-effective coconut husk for the removal of toxic metal ions for environmental protection. *Journal of environmental management.* 2006;81(3):286-295.
11. Gupta S., Babu B. V. Experimental investigations and theoretical modeling aspects in column studies for removal of Cr(VI) from aqueous solutions using activated tamarind seeds. *Journal of Water Resource and Protection.* 2010;2(8):706-716.
12. Mutongo F., Kuipa O., Kuipa P. K. Removal of Cr (VI) from aqueous solutions using powder of potato peelings as a low cost sorbent. *Bioinorganic chemistry and applications.* 2014;2014:973153.
13. Sainova V. N. *New technologies and modes of wastewater treatment processes in food production:* monograph. Astrahan: Sorokin Roman Vasiljevich publ.; 2011. 102 p. (In Russ.).
14. Mohan D., Singh K. P., Singh V. K. Trivalent chromium removal from wastewater using low cost activated carbon derived from agricultural waste material and activated carbon fabric cloth. *Journal of hazardous materials.* 2006;135(1-3):280-295.
15. Neolaka Y. A., Riwu A. A., Aigbe U. O., Ukhurebor K. E., Onyancha R. B., Darmokoesoemo H., Kusuma H. S. Potential of activated carbon from various sources as a low-cost adsorbent to remove heavy metals and synthetic dyes. *Results in Chemistry.* 2022;5:100711.
16. Gao H., Liu Y., Zeng G., Xu W., Li T.,

- Xia W. Characterization of Cr(VI) removal from aqueous solutions by a surplus agricultural waste – Rice straw. *Journal of Hazardous Materials*. 2008;150:446-452.
17. Haydar S., Aziz J. A., Ahmad M. S. Biological treatment of tannery wastewater using activated sludge process. *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2007;1:61-66.
18. Elmagd A. M. A., Mahmoud M. S. Tannery wastewater treatment using activated sludge process system (lab scale modeling). *International Journal of Engineering and Technical Research*. 2014;2(5):21-28.

The manuscript was submitted on 31.01.2024; reviewed on 28.03.2024; adopted for publication on 31.05.2024

#### Information about the authors

*LASSANA Diop* – postgraduate student at the Department of Life Safety and Environmental Engineering, Astrakhan State Technical University, Astrakhan. Research interests – new wastewater treatment methods. Author of 5 publications. E-mail: lassanakarifo@gmail.com

*SAINOVA Victoria Nikolaevna* – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Life Safety and Environmental Engineering, Astrakhan State Technical University, Astrakhan. Research interests – new wastewater treatment technologies. Author of more than 80 publications. E-mail: sainovav@yandex.ru

**Contribution of the authors:** Lassana Diop – carrying out the experiment, processing and analyzing experimental data, drafting the manuscript; Sainova V. N. research concept, manuscript revision.

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest.

The authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

Научная статья

УДК 330.356.7 621.311.21

DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.86>

EDN: PXHBOW

## Гидромеханическая аналогия для вычисления кинематических параметров жидкого моля

А. Г. Поздеев<sup>✉</sup>, Ю. А. Кузнецова, В. Г. Котлов, Г. М. Гаджиев

Поволжский государственный технологический университет (г. Йошкар-Ола)

PozdeevAG@volgatech.net<sup>✉</sup>

**Аннотация.** *Введение.* Обоснованы положения методики расчета кинематических характеристик движения жидких частиц при волнении на поверхности водоема в соответствии с линейной теорией волн Эри на основе гидромеханической аналогии. В состав кинематических характеристик волновых процессов, возникающих от действия ветровой нагрузки на поверхности водохранилищ, входят величины перемещений, скоростей и ускорений частиц жидкости, которые в гидромеханике именуется жидкими молями. Для упрощения расчета кинематических характеристик жидких частиц использована гидромеханическая аналогия. В качестве модели эллиптического движения частиц жидкости под волновой поверхностью акватории водоема определены характеристики кинематики кривошипно-шатунного механизма, имеющих аналогичные траектории.

*Цель работы* состоит в создании автоматизированной модели расчета кинематических характеристик жидких частиц при волновых процессах на поверхности водоема на основе аналогии с кривошипно-шатунным механизмом.

*Математическое моделирование.* В процессе математического моделирования составляются уравнения движения конца кривошипа в системе декартовых координат. Траекторией точки конца кривошипа является окружность. Определяются проекции вектора скорости точки конца кривошипа на координатные оси путем дифференцирования ее координат по времени и находится модуль вектора скорости этой точки. Затем найдено направление вектора ускорения. После определения уравнений движения центра шатуна выводится уравнение траектории этой точки, которая представляет собой эллипс. Определены величины угловых частот вращения кривошипа и геометрические параметры звеньев механизма, позволяющие составить уравнения траекторий в точках механизма-аналога. Найдены модули вектора ускорения точки конца кривошипа. В результате дифференцирования декартовых компонент скорости центра шатуна по времени определяются проекции вектора ускорения на координатные оси. Показано, что траектория этой точки носит эллиптический характер. Установлены характеристики движения поршня механизма-аналога.

*Выводы.* Представлены результаты сравнительного анализа кинематических характеристик жидких молей при волнении на свободной поверхности водоемов и кинематики точек кривошипно-шатунного механизма. В результате расчета в среде Mathcad установлена аналогия указанных характеристик. Результаты работы могут служить основой для расчета кинематики и динамики движения жидких частиц при формировании на поверхности воды ветровых волн малой амплитуды и моделирования волнения с заданными параметрами на поверхности воды в лабораторных условиях.

**Ключевые слова:** кинематика движения; кинематические параметры; жидкая частица; жидкий моль, гидромеханическая аналогия; механизм-аналог; модель эллиптического движения; волновая поверхность; ветровая волна малой амплитуды; кривошипно-шатунный механизм; Mathcad.

**Финансирование:** авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

---

**Для цитирования:** Гидромеханическая аналогия для вычисления кинематических параметров жидкого моля / А. Г. Поздеев, Ю. А. Кузнецова, В. Г. Котлов, Г. М. Гаджиев // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2024. № 1 (29). С. 86–94. DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.86>; EDN: PXHBOW

---

© Поздеев А. Г., Кузнецова Ю. А., Котлов В. Г., Гаджиев Г. М., 2024.

### Введение

Расчет кинематических характеристик волновых процессов, возникающих от действия ветровой нагрузки на поверхности водохранилищ [8], связан с определением величин перемещений, скоростей и ускорений частиц жидкости, которые в гидромеханике именуется жидкими молями. Для упрощения расчета кинематических характеристик жидких частиц в качестве начального приближения может быть использована гидромеханическая аналогия [7]. В связи с тем что в линейной модели волн Эри [2] под возмущенной волновой свободной поверхностью воды жидкие частицы описывают эллиптические траектории, движение отдельных точек кривошипно-шатунного механизма может служить основой отмеченной гидромеханической аналогии [1].

В процессе расчета для определения кинематических параметров предложена аналогия между движением жидкого моля непосредственно под свободной поверхностью волны Эри [4] и движением кривошипа кривошипно-шатунного механизма [9]. Аналогия обоснована тем, что под поверхностью волны концевая точка кривошипа совершает движения по окружности. По мере погружения жидкого моля окружность преобразуется в эллипс и в пределе при больших глубинах жидкий моль начинает совершать только горизонтальные колебания.

Далее в автоматизированном режиме в результате символьных преобразований [10] определяются траектория, скорость и ускорение конца кривошипа и середины  $M$  шатуна, скорость и ускорение поршня кривошипно-шатунного механизма.

**Цель работы** состоит в разработке автоматизированной модели расчета кинематических характеристик жидких частиц при волновых процессах на поверхности водоема на основе гидромеханической аналогии с кривошипно-шатунным механизмом.

### Математическое моделирование

В процессе математического моделирования составляются уравнения движения конца кривошипа в системе декартовых координат. Траекторией точки конца кривошипа является окружность, центр которой совпадает с началом координат.

В начальный момент задается положение точки конца кривошипа, а затем устанавливается, что абсцисса положения этой точки убывает со временем, а ордината, напротив, возрастает, будучи положительной [9]. Следовательно, движение рассматриваемой точки происходит по окружности против часовой стрелки.

Затем определяются проекции вектора скорости конца кривошипа на координатные оси путем дифференцирования ее координат по времени. Отсюда находится модуль вектора скорости этой точки, который не зависит от времени. Направление вектора скорости вычисляется как отношение найденных компонентов скоростей к модулю вектора скорости.

Вектор скорости в точке конца кривошипа перпендикулярен к радиусу-вектору указанной точки. Проекция вектора ускорения этой точки на координатные оси получены дифференцированием по времени. Модуль вектора ускорения не меняется с течением времени. Таким образом, несмотря на постоянство модуля вектора скорости точки, вектор ускорения этой точки не обращается в нуль. Это объясняется тем, что движение точки происходит по криволинейной траектории и вектор скорости все время изменяет свое направление.

Затем найдено направление вектора ускорения, которое показывает, что при равномерном движении точки конца кривошипа по окружности вектор ее ускорения направлен вдоль кривошипа к центру окружности.

На следующем этапе расчета определяются траектория, скорость и ускорение точки центра шатуна. После определения уравнений движения точки центра шату-

на, возведения их в квадрат и сложения выводится уравнение траектории этой точки. Из формы уравнения следует, что траектория представляет собой эллипс.

Дифференцирование уравнения движения точки центра шатуна по времени дает проекции вектора скорости этой точки на координатные оси. Отсюда находится модуль вектора скорости, который меняется с течением времени.

В результате дифференцирования декартовых компонент скорости центра шатуна по времени определяются проекции вектора ускорения на координатные оси.

Из анализа следует, что модуль вектора ускорения точки меняется пропорционально ее расстоянию от начала координат, т.е. от центра эллипса.

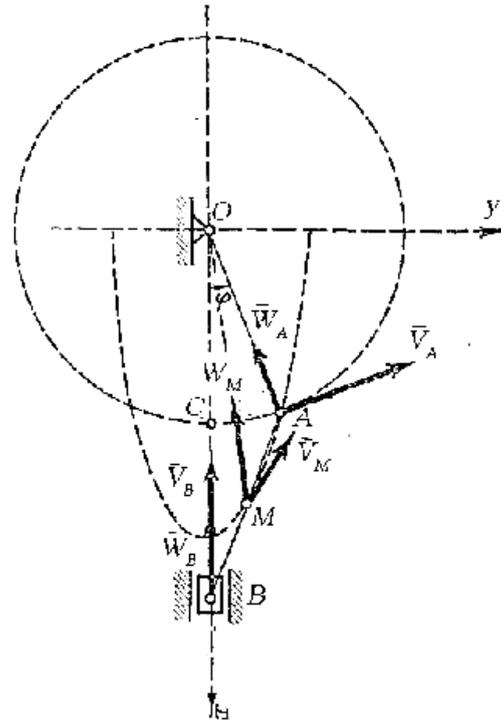
Затем устанавливается, что направление вектора ускорения части шатуна от его центра до ползуна совпадает с направлением от центра шатуна к оси вращения кривошипа.

Далее составляется уравнение движения поршня и на его основе в результате дифференцирования по времени находятся скорость и ускорение движения поршня в проекциях на оси исходной декартовой системы координат.

Поршень из исходного положения движется ускоренно. Найденные кинематические уравнения движения шатуна служат основой для расчета кинематики и динамики движения жидких частиц в соответствии с линейной теорией волн Эри.

Ниже приведен листинг автоматизированного вывода уравнений в соответствии с изложенным алгоритмом в символьном режиме среды Mathcad [5].

Определим траекторию, скорость и ускорение конца  $A$  кривошипа  $OA$  и середины  $M$  шатуна  $AB$ , а также скорость и ускорение поршня  $B$  кривошипно-шатунного механизма (см. рисунок), если  $OA = AB = 2a$ , а угол  $\varphi$  при вращении кривошипа растет пропорционально времени:  $\varphi = \omega t$ , где  $\omega = \text{const}$  и  $\omega > 0$ .



**Кинематика кривошипно-шатунного механизма**

Kinematics of the crank mechanism

Угловая частота вращения кривошипа  $\omega_T$ , рад/с.

Угол положения кривошипа относительно оси абсцисс, рад,

$$\varphi(t) := \omega_T \cdot t, \quad \varphi(t) \rightarrow t \cdot \omega_T.$$

Длина кривошипа, м,  $OA := 2 \cdot a$ .

Длина шатуна, м,  $AB := 2 \cdot a$ .

Сначала составляются уравнения движения конца  $A$  кривошипа  $OA$  в системе декартовых координат  $x$  и  $y$  с началом в точке  $O$ .

Обозначая координаты точки  $A$  через  $x_A$  и  $y_A$ , находим

$$x_A(t) := OA \cdot \cos(\varphi(t)),$$

$$x_A(t) \rightarrow 2 \cdot a \cdot \cos(t \cdot \omega_T);$$

$$y_A(t) := OA \cdot \sin(\varphi(t)),$$

$$y_A(t) \rightarrow 2 \cdot a \cdot \sin(t \cdot \omega_T).$$

Для определения траектории точки  $A$  возведем эти уравнения в квадрат и сло-

жим. Тогда получим

$$x_A(t)^2 + y_A(t)^2 \text{ simplify } \rightarrow 4 \cdot a^2.$$

Следовательно, траекторией точки  $A$  является окружность радиуса  $a$ , центр которой совпадает с началом координат.

В начальный момент при  $t = 0$  запишем  $x_A = a$ ,  $y_A = 0$ . Движущаяся точка  $A$  находится в положении точки  $C$ .

При возрастании времени  $t$  от 0 до  $\frac{\pi}{2\omega}$  функция  $x_A = 2a \cos \omega t$  убывает, а  $y_A$  возрастает, будучи положительной. Следовательно, движение точки  $A$  по окружности происходит против часовой стрелки.

Проекции вектора скорости  $\vec{v}_A$  точки  $A$  на координатные оси получим, дифференцируя  $x_A$  и  $y_A$  по времени  $t$ :

$$v_{Ax}(t) := \left( \frac{d}{dt} x_A(t) \right) v_{Ax}(t) \rightarrow -2 \cdot a \cdot \omega_T \cdot \sin(t \cdot \omega_T),$$

$$v_{Ay}(t) := \left( \frac{d}{dt} y_A(t) \right) v_{Ay}(t) \rightarrow 2 \cdot a \cdot \omega_T \cdot \cos(t \cdot \omega_T).$$

Отсюда находим модуль вектора скорости  $\vec{v}_A$ :

$$v_A(t) := \sqrt{v_{Ax}(t)^2 + v_{Ay}(t)^2} v_A(t) \text{ simplify } \rightarrow 2 \cdot \sqrt{a^2 \cdot \omega_T^2},$$

т.е. модуль вектора скорости  $v_A$  не меняется с течением времени. Направление вектора скорости  $\vec{v}_A$

$$\frac{v_{Ax}(t)}{v_A(t)} \Big|_{\text{substitute, } a \cdot \omega = \sqrt{a^2 \cdot \omega^2}} \text{ simplify } \rightarrow -\frac{a \cdot \omega_T \cdot \sin(t \cdot \omega_T)}{\sqrt{a^2 \cdot \omega_T^2}},$$

$$\frac{v_{Ay}(t)}{v_A(t)} \Big|_{\text{substitute, } a \cdot \omega = \sqrt{a^2 \cdot \omega^2}} \text{ simplify } \rightarrow \frac{a \cdot \omega_T \cdot \cos(t \cdot \omega_T)}{\sqrt{a^2 \cdot \omega_T^2}}.$$

Вектор скорости  $\vec{v}_A$  перпендикулярен радиусу-вектору  $\vec{OA}$  точки  $A$ .

Проекции вектора ускорения  $\vec{w}_A$  точки  $A$  на координатные оси получим, дифференцируя  $v_{Ax}$  и  $v_{Ay}$  времени  $t$ :

$$w_{Ax}(t) := \frac{d}{dt} v_{Ax}(t),$$

$$w_{Ax}(t) \rightarrow -2 \cdot a \cdot \omega_T^2 \cdot \cos(t \cdot \omega_T);$$

$$w_{Ay}(t) := \frac{d}{dt} v_{Ay}(t),$$

$$w_{Ay}(t) \rightarrow -2 \cdot a \cdot \omega_T^2 \cdot \sin(t \cdot \omega_T).$$

Отсюда находим модуль вектора ускорения  $\vec{w}_A$ :

$$w_A := \sqrt{w_{Ax}(t)^2 + w_{Ay}(t)^2} w_A \text{ simplify } \rightarrow 2 \cdot \sqrt{a^2 \cdot \omega_T^4}.$$

Модуль вектора ускорения  $\vec{w}_A$  также не меняется с течением времени. Таким образом, несмотря на постоянство модуля вектора скорости  $\vec{v}_A$  точки  $A$ , вектор ускорения  $\vec{w}_A$  этой точки не обращается в

нуль. Это объясняется тем, что движение точки  $A$  происходит по криволинейной траектории и вектор скорости  $\vec{v}_A$  все время изменяет свое направление.

Направление вектора ускорения  $\vec{w}_A$

$$\frac{w_{Ax}(t)}{w_A(t)} \left| \begin{array}{l} \text{substitute, } 1 = \sin(\omega \cdot t)^2 + \cos(\omega \cdot t)^2 \\ \text{substitute, } a \cdot \omega^2 = \sqrt{a^2 \cdot \omega^4} \end{array} \right. \rightarrow -\frac{a \cdot \omega_T^2 \cdot \cos(t \cdot \omega_T)}{\sqrt{a^2 \cdot \omega_T^4}},$$

$$\frac{w_{Ay}(t)}{w_A(t)} \left| \begin{array}{l} \text{substitute, } 1 = \sin(\omega \cdot t)^2 + \cos(\omega \cdot t)^2 \\ \text{substitute, } a \cdot \omega^2 = \sqrt{a^2 \cdot \omega^4} \end{array} \right. \rightarrow -\frac{a \cdot \omega_T^2 \cdot \sin(t \cdot \omega_T)}{\sqrt{a^2 \cdot \omega_T^4}}.$$

Отсюда нетрудно установить, что при рассматриваемом равномерном движении точки  $A$  по окружности ее вектор ускорения  $\bar{w}_A$  направлен вдоль  $AO$  к центру окружности.

Теперь определим траекторию, скорость и ускорения точки  $M$  шатуна  $AB$ . Начинаем с определения уравнений движения точки  $M$ . Обозначая координаты точки  $M$  через  $x_A$  и  $y_A$ , находим

$$x_M(t) := 2 \cdot a \cdot \cos(\varphi(t)) + a \cdot \cos(\varphi(t)) \quad x_M(t) \text{ simplify} \rightarrow 3 \cdot a \cdot \cos(t \cdot \omega_T),$$

$$y_M(t) := a \cdot \sin(\varphi(t)) \quad y_M(t) \rightarrow a \cdot \sin(t \cdot \omega_T).$$

Возводя обе части этих уравнений в квадрат и сложив их, получим уравнение траектории точки  $M$ :

$$\left[ \left( \frac{x_M(t)}{3 \cdot a} \right)^2 + \left( \frac{y_M(t)}{a} \right)^2 \right] \text{ simplify} \rightarrow 1.$$

Следовательно, траектория точки  $M$  – эллипс с полуосями  $3a$  и  $a$ .

Дифференцируя уравнения движения точки  $M$  по времени  $t$ , получим проекции

вектора скорости  $\bar{v}_M$  этой точки на координатные оси:

$$v_{Mx}(t) := \frac{d}{dt} x_M(t),$$

$$v_{Mx}(t) \rightarrow -3 \cdot a \cdot \omega_T \cdot \sin(t \cdot \omega_T);$$

$$v_{My}(t) := \frac{d}{dt} y_M(t),$$

$$v_{My}(t) \rightarrow a \cdot \omega_T \cdot \cos(t \cdot \omega_T).$$

Отсюда находим модуль вектора ускорения  $\bar{v}_M$

$$v_M(t) := \sqrt{v_{Mx}(t)^2 + v_{My}(t)^2} \quad v_M(t) \rightarrow \sqrt{a^2 \cdot \omega_T^2 \cdot \cos(t \cdot \omega_T)^2 + 9 \cdot a^2 \cdot \omega_T^2 \cdot \sin(t \cdot \omega_T)^2},$$

т.е. модуль вектора скорости меняется с течением времени от  $v_{\min} = a\omega$  до  $v_{\max} = 3a\omega$ .

Дифференцируя значения  $v_{Mx}$  и  $v_{My}$  по времени  $t$ , определим проекции вектора ускорения  $\bar{w}_M$  на координатные оси:

$$w_{Mx}(t) := \frac{d^2}{dt^2} x_M(t),$$

$$w_{Mx}(t) \text{ simplify} \rightarrow -3 \cdot a \cdot \omega_T^2 \cdot \cos(t \cdot \omega_T);$$

$$w_{My}(t) := \frac{d^2}{dt^2} y_M(t),$$

$$w_{My}(t) \rightarrow -a \cdot \omega_T^2 \cdot \sin(t \cdot \omega_T).$$

Введем новые обозначения для компонент ускорений:

$$x(t) := -3 \cdot a \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad y(t) := -a \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t).$$

Тогда после подстановки определенных выше значений координат точки  $M$

$$x_M(t) \rightarrow 3 \cdot a \cdot \cos(t \cdot \omega_T) \quad y_M(t) \rightarrow a \cdot \sin(t \cdot \omega_T)$$

запишем

$$x''_M(t) := -\omega^2 \cdot x_M(t) \quad y''_M(t) := -\omega^2 \cdot y_M(t).$$

Отсюда находим модуль вектора ускорения  $\bar{w}_M$ :

$$\omega_M(t) := \sqrt{v_{Mx}(t)^2 + \omega_{My}(t)^2} \omega_M(t) \rightarrow \sqrt{9 \cdot a^2 \cdot \omega_T^4 \cdot \cos(t \cdot \omega_T)^2 + a^2 \cdot \omega_T^4 \cdot \sin(t \cdot \omega_T)^2},$$

или

$$\omega_M(t) := \sqrt{(-\omega^2 \cdot x_M(t))^2 + (-\omega^2 \cdot y_M(t))^2} \text{ simplify} \rightarrow \sqrt{\omega^4 \cdot (x_M(t)^2 + y_M(t)^2)},$$

где  $r$  – модуль радиуса-вектора  $r$  точки  $M$ , проведенного из начала координат  $O$  до точки  $M$ . Модуль вектора ускорения точки  $M$  меняется пропорционально ее расстоянию от начала координат  $O$ , т.е. от центра эллипса.

Направление вектора ускорения  $W_M$  определим, используя равенства

$$r(t) := \sqrt{x_M(t)^2 + y_M(t)^2} w_{Mx} := x_M \cdot \omega^2 w_{My} := y_M \cdot \omega^2 w_M := r \cdot \omega^2.$$

$$\cos(w_{M_i}) := \frac{w_{Mx}(t)}{w_M(t)} \cos(w_{M_i}) \rightarrow \frac{x_M(t)}{r(t)},$$

$$\cos(w_{M_j}) := \frac{w_{My}(t)}{w_M(t)} \cos(w_{M_j}) \rightarrow \frac{y_M(t)}{r(t)}.$$

Отсюда находим, что вектор ускорения  $\bar{w}_M$  движущейся точки  $M$  направлен вдоль  $MO$  к центру эллипса.

Составим теперь уравнение движения поршня  $B$ . Обозначая абсциссу точки  $B$  через  $x_B$ , находим  $x_B = 4a \cos \varphi$ , или, подставляя  $\varphi = \omega t$ ,

$$x_B(t) := 4 \cdot a \cdot \cos(\omega \cdot t).$$

Это уравнение и определяет уравнение движения поршня  $B$ .

В следующих модулях расчета круговая частота переобозначается в виде

$$\omega_T := \omega.$$

Найдем теперь скорость и ускорение поршня  $B$ . Дифференцируя уравнение движения поршня по времени, получаем проекцию вектора скорости  $\bar{v}_B$  поршня на ось  $Ox$ :

$$v_{Bx}(t) := \frac{d}{dt} x_B(t),$$

$$v_{Bx}(t) \rightarrow -4 \cdot a \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t).$$

Знак «минус» показывает, что вектор скорости  $\bar{v}_B$  в данный момент направлен в

сторону, обратную положительному направлению оси  $Ox$ .

Проекцию вектора ускорения  $\bar{w}_B$  поршня на ось  $Ox$  получим, дифференцируя  $v_{Bx}$  по времени  $t$ :

$$w_{Bx}(t) := \frac{d^2}{dt^2} x_B(t),$$

$$w_{Bx}(t) \rightarrow -4 \cdot a \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t).$$

Знаки  $v_{Bx}$  и  $w_{Bx}$  указывают направление векторов скорости  $\bar{v}_B$  и ускорения  $\bar{w}_B$ .

Поршень из рассматриваемого положения движется ускоренно.

### Выводы

Для анализа волновых процессов на свободной поверхности акваторий при условии возникновения ветровых волн малой амплитуды предложена гидромеханическая аналогия. В качестве механизма-аналога выбран кривошипно-шатунный механизм, отдельные точки которого описывают эллиптические траектории подобно частицам жидкости в процессе формирования волн Эри [6]. Для выделенных точек, включающих конец кривошипа, центры шатуна и поршня, определены траектории движения при условии равномерного вращения кривошипа. Установлено, что траекторией движения конца кривошипа является окружность, траекторией центра шатуна – эллипс, а центра поршня – прямая линия. В процессе расчетов в символьном режиме вычисляются координаты перечисленных трех точек в функции от времени, в результате дифференцирования позволяющие определить проекции скоростей на оси координат, найти величину модуля вектора скорости и его направление. Повторное дифференцирование скорости по времени определяет компоненты проекций ускорения, его модуль и направление. Для оценки геометрических, кинематических и динамических характеристик

наиболее важны параметры движения центра шатуна, которые аналогичны движению жидких частиц под возмущенной свободной поверхностью воды [3].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышников Н. Б. Динамика русловых потоков. Санкт-Петербург: Изд-во РГГМУ, 2007. 314 с.
2. Бреббия К., Уокер С. Динамика морских сооружений. Ленинград: Судостроение, 1983. 232 с.
3. Вибрации в технике: справочник: в 6 т. Т. 4: Вибрационные процессы и машины / под ред. Э. Э. Лавендела. Москва: Машиностроение, 1981. 508 с.
4. Гришанин К. В. Теория руслового процесса. Москва: Транспорт, 1972. 216 с.
5. Гурский Д. А. Вычисления в Mathcad. Москва: Новое знание, 2003. 814 с.
6. Логвинович Г. В. Гидродинамика течений со свободными границами. Киев: Наукова думка, 1969. 209 с.
7. Михалев М. А. Теория подобия и размерностей: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГГТУ, 2001. 65 с.
8. Поздеев А. Г., Котлов В. Г., Кузнецова Ю. А. Автоматизация вычисления параметров ветровых волн, развивающихся на акватории водохранилищ // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2021. № 3. С. 41-50.
9. Сахарный Н. Ф. Курс теоретической механики. Москва: Высш. школа, 1964. 844 с.
10. Семенов М. Г. Математическое моделирование в Mathcad. Москва: Альтекс-А, 2003. 208 с.

Статья поступила в редакцию 15.05.2024; одобрена после рецензирования 30.05.2024; принята к публикации 03.06.2024

#### Информация об авторах

*ПОЗДЕЕВ Анатолий Геннадиевич* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных конструкций и водоснабжения, советник РААСН, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов – исследование и моделирование русловых процессов в нижних бьефах гидроузлов, математическое моделирование в гидродинамике и экологии, автоматизация расчета инженерных систем водо-, газо- и теплоснабжения в строительстве. Автор более 130 научных трудов, в том числе 10 монографий, 13 учебных пособий, 11 патентов и авторских свидетельств на изобретения. E-mail: PozdeevAG@volgatech.net

*КУЗНЕЦОВА Юлия Анатольевна* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций и водоснабжения, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов – исследование и моделирование русловых процессов в нижних бьефах гидроузлов, математическое моделирование в гидродинамике и экологии. Автор 87 научно-методических работ, в том числе 5 монографий, 12 учебных пособий и патента РФ. E-mail: KuznecovaYA@volgatech.net

*КОТЛОВ Виталий Геннадьевич* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций и водоснабжения, проректор по воспитательной работе, Поволжский государственный технологический университет, советник РААСН, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов – соединения элементов деревянных конструкций, тепло-массоперенос. Автор 130 научно-методических работ, в том числе монографии, 6 учебных пособий и 8 авторских свидетельств и патентов РФ и 13 патентов на полезную модель. E-mail: KotlovVG@volgatech.net

*ГАДЖИЕВ Гасан Магамедрасулович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры эксплуатации машин и оборудования, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов – исследование и моделирование процессов нефте-, газоснабжения предприятий и гражданских зданий, математическое моделирование в области машин и технологии лесной промышленности. Автор 37 научно-методических работ, в том числе монографии, 13 учебных пособий и 4 патентов РФ. E-mail: GadzhievGM@volgatech.net

**Вклад авторов:** авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article  
UDC 330.356.7 621.311.21  
DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.86>  
EDN: PXHBOW

## Hydromechanical analogy for calculating kinematic parameters of liquid moles

A. G. Pozdeev<sup>✉</sup>, Iu. A. Kuznetsova, V. G. Kotlov, G. M. Gadzhiev  
Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola)  
PozdeevAG@volgatech.net<sup>✉</sup>

**Abstract.** *Introduction.* The paper substantiates the methodology for calculating kinematic characteristics of fluid particle motion due to waves on the water reservoir surface, in accordance with the Airy linear wave theory, on the basis of the hydromechanical analogy. In hydromechanics, fluid particles—known as liquid moles—have kinematic properties such as displacements, velocities, and accelerations that result from wind action on the surface of the water reservoir. It was determined to apply the hydromechanical analogy to simplify the computation of the kinematic properties of fluid particles. The authors calculate the kinematic features of a crank-and-rod mechanism, which has similar trajectories, as a model of elliptical motion of fluid particles under the wave surface of the water reservoir.

*The aim of the research* is to develop an automated model for calculating kinematic characteristics of fluid particles in wave processes on the water reservoir surface, based on the analogy with the crank-and-rod mechanism.

*Materials and methods.* It was possible to develop crank end equations of motion in the Cartesian coordinate system throughout the mathematical modelling stage. The crank end trajectory is round. By dividing the coordinates of the crank end velocity vector by time, it was possible to derive the modulus of a velocity vector and project it onto coordinate axes. Next, a vector of acceleration's direction was calculated.

*Mathematical modeling.* An equation of the rod's trajectory—an ellipse—were obtained by figuring out the equations of motion of the rod centre. By determining the geometric parameters of the mechanism linkages and the crank's angular frequencies of rotation, equations of trajectories at the mechanism-analog sites were derived at the points of the mechanism-analog. It was possible to determine the crank end acceleration vector's moduli. The acceleration vector's projections on coordinate axes were determined by differentiating the Cartesian components of the rod centre velocity by time. This proved that this point's trajectory was elliptical. The characteristics of motion of a piston of the mechanism-analog were determined.

*Conclusion.* The kinematic properties of liquid moles during agitation on the open surface of reservoirs and the kinematics of the crank mechanism's points are compared, and the findings are reported.

Through calculations in Mathcad, the authors were able to establish the analogy between these characteristics. The study outcomes can be used as a foundation for modelling waves with specific parameters on the water surface in a laboratory setting as well as for calculating the kinematics and dynamics of fluid particle motion caused by small amplitude wind waves on the water surface.

**Keywords:** kinematics of motion; kinematic parameters; fluid particle; liquid mole, hydromechanical analogy; mechanism-analog; elliptic motion model; wave surface; small amplitude wind wave; crank-and-rod mechanism; Mathcad.

**Funding:** this research received no external funding.

---

**For citation:** Pozdeev A. G., Kuznetsova Iu. A., Kotlov V. G., Gadzhiev G. M. Hydromechanical analogy for calculating kinematic parameters of liquid moles. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies.* 2024;(1):86–94. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.86>; EDN: PXHBOW

---

## REFERENCES

1. Baryshnikov N. B. Dynamics of channel currents. Saint Petersburg: RGGMU Publishing House; 2007. 314 p. (In Russ.).
2. Brebbia K., Walker S. Dynamics of marine structures. Leningrad: Shipbuilding; 1983. 232 p. (In Russ.).
3. Vibrations in machinery: A reference book. Edited by E. E. Lavendela. Moscow: Mashinostroenie [Machine building]; 1981. Vol. 4: Vibration processes and machines. 508 p. (In Russ.).
4. Grishanin K. V. Theory of the channel process. Moscow: Transport; 1972. 216 p. (In Russ.).
5. Gurskii D. A. Calculations in MathCAD. Moscow: Novoeznanie [New Knowledge]; 2003. 814 p. (In Russ.).
6. Logvinovich G. V. Hydrodynamics of flows with free boundaries. Kiev: Naukova dumka [Scientific thought]; 1969. 209 p. (In Russ.).
7. Mikhalev M. A. *Theory of similarity and dimensions. Student manual*. Saint Petersburg: Izd-vo SPbGTU; 2001. 65 p. (In Russ.).
8. Pozdeev A. G., Kotlov V. G., Kuznetsova Iu. A. Automation of calculation of parameters of wind waves developing in the water area of reservoirs. *Bulletin of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies*. 2021;(3):41–50. (In Russ.).
9. Sakharnyi N. F. *Course of theoretical mechanics*. Moscow: Vyssh. Shkola; 1964. 844 p. (In Russ.).
10. Semenenko M. G. Mathematical modeling in Mathcad. Moscow: Alteks-A; 2003. 208 p. (In Russ.).

The manuscript was submitted on 15.05.2024; reviewed on 30.05.2024; adopted for publication on 03.06.2024

**Information about the authors**

*POZDEEV Anatolii Gennadevich* – Doctor of Engineering Sciences, Professor of Civil Engineering and Water Supply Department, Advisor of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Research interests – modelling channel processes in hydrosystem tailraces, mathematical modeling in hydrodynamics and ecology, automation of calculation of water, gas and heat supply systems in construction. Author of more than 130 publications including 10 monographs, 13 student manuals, 11 patents and certificates for inventions. E-mail: PozdeevAG@volgatech.net

*KOTLOV Vitalii Gennadevich* – Advisor of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor of Civil Engineering and Water Supply Department, Vice Rector for Education, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Research interests – connections of elements in wooden structures; heat and mass transfer. Author of 130 publications including monograph, 6 student manuals, 8 certificates and patents of the Russian Federation, and 13 utility model patents. E-mail: KotlovVG@volgatech.net

*KUZNETSOVA Iuliia Anatolevna* – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Civil Engineering and Water Supply Department, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Research interests – research and modeling of channel processes in hydrosystem tailraces, mathematical modeling in hydrodynamics and ecology. Author of 87 publications including 5 monographs, 12 student manuals and patent of the Russian Federation. E-mail: KuznecovaYA@volgatech.net

*GADZHIEV Gasan Magamedrasulovich* – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Machinery and Equipment Operation, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Research interests – research and modeling of oil and gas supply of enterprises and civil buildings, mathematical modeling in the field of machinery and technology of the forest industry. Author of 37 publications, including monograph, 13 student manuals and 4 patents of the Russian Federation. E-mail: GadzhievGM@volgatech.net

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this paper.

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest.

The authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция журнала «Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии» принимает к публикации рукописи, соответствующие профилю издания по следующим научным специальностям: 2.1.1. **Строительные конструкции, здания и сооружения** (технические науки), 2.1.4. **Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов** (технические науки), 2.1.5. **Строительные материалы и изделия** (технические науки), 2.1.6. **Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология** (технические науки), 2.1.7. **Технология и организация строительства** (технические науки), 2.1.10. **Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства** (технические науки), 2.5.5. **Технология и оборудование механической и физико-технической обработки** (технические науки), 2.5.9. **Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды** (технические науки), 2.5.21. **Машины, агрегаты и технологические процессы** (технические науки), 4.3.4. **Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины** (технические науки).

Основные разделы журнала – «**Материалы**», «**Конструкции**», «**Технологии**», «**Экология**»; дополнительные – «**Новинки техники и технологий**», «**Обзоры и рецензии**», «**Конференции**», «**Важные даты**».

Рукопись должна содержать только оригинальный материал, отражающий результаты завершённых исследований автора, объёмом 7–15 страниц, включая рисунки. К печати принимаются материалы, которые не опубликованы и не переданы в другие редакции. Рукописи проходят обязательное рецензирование. В журнале печатаются только статьи, получившие положительную рецензию.

### **Требования к оригиналам предоставляемых работ**

*Рекомендуемая структура научной работы* (названия рубрик в тексте выделить жирным шрифтом):

1. Аннотация (резюме) – 200–250 слов.
2. Ключевые слова или словосочетания (отделяются друг от друга точкой с запятой).
3. Введение (оценка состояния вопроса, основанная на обзоре литературы с мотивацией актуальности; выявленное противоречие, позволяющее сформулировать проблемную ситуацию).
4. Цель работы, направленная на преодоление проблемной ситуации (1–2 предложения).
5. Решаемые задачи, направленные на достижение цели.
6. Математическое, аналитическое или иное моделирование.
7. Техника эксперимента и методика обработки или изложение иных полученных результатов.
8. Интерпретация результатов или их анализ.
9. Выводы, отражающие новизну полученных результатов, показывающих, что цель, поставленная в работе, достигнута.

Название статьи, сведения об авторах, аннотация и ключевые слова приводятся также на английском языке.

### **Требования к оформлению рукописи**

Рукопись должна быть представлена в электронном виде на бумаге формата А4. Шрифт Times New Roman, размер шрифта 12 пт, межстрочный интервал 1. Поля: левое, правое – 2,5 см, верхнее, нижнее – 3 см, абзацный отступ первой строки на 0,75 см.

На первой странице рукописи слева печатается УДК (размер шрифта 10 пт, прямой, светлый) без отступа. Название работы размещается по центру (размер шрифта 14 пт, прямой, полужирный, строчной). Ниже по центру приводятся инициалы, фамилия автора (размер шрифта 12 пт, курсив, полужирный). После фамилий авторов указываются места работы: первая строка – название организации, вторая строка – почтовый адрес (размер шрифта 10 пт, курсив); после адресов – электронный адрес автора, отвечающего за переписку. Далее располагается аннотация (выравнивание по ширине, размер шрифта 10 пт, отступ слева и справа 1 см). Аналогично оформляются ключевые слова.

**Список литературы** оформляется согласно порядку ссылок в тексте (указываются в квадратных скобках) в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. При оформлении References рекомендуется придерживаться формата Vancouver Citation Style. Указание DOI (при наличии) в выходных данных обязательно. Ответственность за достоверность и точность цитируемых источников несут авторы статей.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Рукопись должна быть подписана автором (авторами). После подписи автора и даты указываются его фамилия, имя, отчество (полностью), место работы, ученая степень, должность, область научных интересов, количество опубликованных работ, телефон, e-mail, домашний адрес.

К материалам прилагаются следующие документы: авторское заявление на имя главного редактора с указанием рубрики журнала; экспертное заключение о возможности опубликования.

Материалы, не соответствующие вышеуказанным требованиям, не рассматриваются.

**Контакты:** 424000, РМЭ, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3, ПГТУ,  
редакция журнала «Вестник ПГТУ.  
Серия: Материалы. Конструкции. Технологии»

Ответственный секретарь – *Смирнов Александр Олегович*

(E-mail: SmirnovAO@volgatech.net)

Тел. редакции 8 (8362) 68-28-26

E-mail: vestnik-mkt@volgatech.net

Подробнее на сайте ПГТУ: [https:// www.volgatech.net /](https://www.volgatech.net/)