



МИНСТРОЙ  
РОССИИ



К сведению читателей!

МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ СТРОИТЕЛЬНОЙ ФИЗИКИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ АРХИТЕКТУРЫ И СТРОИТЕЛЬНЫХ НАУК

1-3 июля 2025 года состоится Международная научная конференция – XVI Академические чтения, посвященные 100-летию академика РААСН Бондаренко В.М. и 96-летию академика РААСН Осипова Г.Л.

«АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ СТРОИТЕЛЬСТВА. НАДЕЖНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.  
ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ»

В этом году темы этого научного мероприятия традиционны и направлены на решение проблем в области обеспечения комфортных условий проживания человека.



**Бондаренко  
Виталий Михайлович**

Российский ученый в области строительных наук, академик РААСН, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, основатель Российской научной школы по железобетону, подготовивший многочисленную плеяду докторов и кандидатов технических наук.



**Осипов  
Георгий Львович**

Ученый в области строительных наук, основоположник направления «Строительная физика» в СССР и РФ, лауреат Государственной премии РФ, заслуженный деятель науки и техники СССР, академик РААСН, профессор, доктор технических наук.

#### НА КОНФЕРЕНЦИИ ПЛАНИРУЕТСЯ РАБОТА ПО СЛЕДУЮЩИМ НАПРАВЛЕНИЯМ:

Надежность и прочность строительных конструкций, зданий и сооружений. Энергосбережение в строительстве. Строительная теплофизика. Строительная и архитектурная акустика. Строительная светотехника. Моделирование процессов. Проблемы технического регулирования в строительстве. Водоснабжение и водоотведение. Высотное строительство. Научная школа для молодежи. Цифровое обеспечение строительства. Машинное обучение и искусственный интеллект в управлении инвестиционно-строительными проектами

В рамках конференции будет проводиться **конкурс**, на котором молодые ученые, аспиранты и студенты смогут представить свои проекты и разработки:

1. На лучший дипломный проект по направлению «Строительные конструкции».
2. На лучший дипломный проект, включающий раздел «Строительная физика».
3. На лучшую работу по направлению «Строительная и архитектурная акустика».
4. На лучший доклад в рамках научной школы для молодежи «Строительная физика, энергосбережение и экологическая безопасность».
5. На лучший дипломный проект, включающий раздел по водоснабжению и водоотведению.

Победителям вручаются премия имени академика РААСН Г.Л. Осипова, памятные призы и подарки.

Для участия в конференции и конкурсе необходимо в срок до **1 июня 2025** года отправить **ЗАЯВКИ и материалы** (конкурсная работа, заявка на участие в конкурсе) по адресу [org.com@niisf.ru](mailto:org.com@niisf.ru)  
**Формы заявок можно посмотреть на сайте [www.niisf.ru](http://www.niisf.ru).**

Конференция состоится в очном формате. Предусмотрена возможность дистанционного участия в конференции по видеосвязи.

#### ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Тел.: +7 (499) 488-70-05 Факс: +7 (495) 482-40-60

E-mail: [org.com@niisf.ru](mailto:org.com@niisf.ru) Сайт: [www.niisf.ru](http://www.niisf.ru)

Адрес: 127238, Москва, Локомотивный проезд, д.21, Светотехнический корпус, НИИСФ РААСН

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ**

**Выходит 4 раза в год**

**Учредитель и издатель**

Пензенский государственный  
университет архитектуры  
и строительства

Адрес издателя, редакции и типографии:  
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28,  
ПГУАС

Тел/факс 8412 929501

E-mail: regas@pguas.ru

fmatem@pguas.ru

www.rais.pguas.ru

**Главная редакция:**

А.М. Данилов (главный редактор)

Е.В. Королев (заместитель  
главного редактора)

И.А. Гарькина (ответственный  
секретарь)

Редакторы: М.А. Сухова

Т.В. Обушникова

Дизайн обложки Е.Г. Лапшина

Компьютерная верстка

Н.А. Сазонова

Перевод О.В. Гринцова

Журнал зарегистрирован

в Федеральной службе по надзору  
за соблюдением законодательства  
в сфере массовых коммуникаций  
и охране культурного наследия

Свидетельство о регистрации

ПИ №ФС77-25956 от 13 октября 2006 г.

Подписной индекс:

**36946** в каталоге Роспечати

Авторы опубликованных материалов  
несут ответственность за достоверность  
приведенных сведений, точность данных  
по цитируемой литературе и за исполь-  
зование в статьях данных, не подлежа-  
щих открытой публикации.

Редакция может опубликовать статьи  
в порядке обсуждения, не разделяя точку  
зрения автора.

Подписано к печати 17.03.2025.

Формат 60x84 1/8.

Уч.-изд.л. 28,625. Тираж 500 экз. Первый завод 100.

Заказ № 37.

Дата выхода в свет 24.03.2025.

Отпечатано в издательстве ПГУАС

Цена 2500 руб.

# РЕГИОНАЛЬНАЯ АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

1(62)/2025

## Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
И ИЗДЕЛИЯ..... 5

**Ибрагимов Р.А., Королев Е.В.**

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЗАТРАТ НА АКТИВАЦИЮ  
МИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ  
В АППАРАТЕ ВИХРЕВОГО СЛОЯ..... 5

**Королев Е.В., Гришина А.Н., Данилов А.М.,  
Айзенштадт А.М.**

ОЦЕНКА СТРУКТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ  
ОТ ОБРАЗОВАНИЯ ПЛЁНОЧНОЙ ФАЗЫ  
МАТРИЧНОГО МАТЕРИАЛА ..... 21

**Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.**  
МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ

К СИНТЕЗУ СЛОЖНЫХ  
СЛАБОФОРМАЛИЗУЕМЫХ СИСТЕМ ..... 35

**Береговой В.А., Лавров И.Ю., Присевка А.С.**  
ФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ

И ТЕПЛОПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА  
СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ  
ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ..... 43

**Макридин Н.И., Максимова И.Н.**

ДЕФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ  
ЛЕГКОГО КОНСТРУКЦИОННОГО БЕТОНА  
ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ ..... 56

**Пинус Б.И., Корнеева И.Г.**

ВРЕМЯ РАЗРУШЕНИЯ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ  
УСТАЛОСТНОГО ИЗНОСА ЦЕМЕНТНЫХ  
КОМПОЗИТОВ ..... 68

**Гарипов А.Р., Макаров Д.Б., Хозин В.Г.,  
Степанов С.В.**

МОДИФИКАЦИЯ КРОВЕЛЬНЫХ  
БИТУМНО-АСБЕСТОВЫХ МАСТИК  
ТОНКОДИСПЕРСНЫМИ ЛАТЕКСНЫМИ  
ЭМУЛЬСИЯМИ ..... 75

**Москвин Р.Н., Белякова Е.А.**

КИНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ  
НАРАСТАНИЯ ПРОЧНОСТИ  
КАРБОНАТНО-ШЛАКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ,  
АКТИВИЗИРОВАННЫХ ЩЕЛОЧНЫМИ  
КОМПОНЕНТАМИ ..... 83

© Авторы публикаций, 2025

© Е.Г. Лапшина, дизайн обложки, 2025

© ПГУАС, 2025

<b>Куимова Е.И., Зайцева М.В., Логанина В.И., Езерский В.А.</b> ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ: МЕТОД АДДИТИВНОЙ СВЕРТКИ.....	90	<b>Рожков В.С., Князев В.А., Князев А.А.</b> НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА НЕЙТРАЛИЗАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ГАЛЬВАНОПРОИЗВОДСТВ, ПРЕДУСМАТРИВАЮЩАЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕАГЕНТА- ОКИСЛИТЕЛЯ ФЕРРАТА НАТРИЯ.....	163
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ .....	98	<b>Осипова Н.Н., Яковлев Д.С., Гришин Б.М.</b> ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ БАЛЛОННЫХ УСТАНОВОК ПРИ ИХ ЗАПОЛНЕНИИ СЖИЖЕННЫМ УГЛЕВОДОРОДНЫМ ГАЗОМ .....	169
<b>Рыбаков В.А., Селиверстов А.В., Цветкова А.А.</b> РАЦИОНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОГРАЖДАЮЩИХ ЛЕГКИХ СТАЛЕБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ.....	98	<b>Баканова С.В.</b> ВОЗДУХООБМЕН В ПОМЕЩЕНИЯХ ХРАНЕНИЯ СКОРОПОРТЯЩЕЙСЯ ПРОДУКЦИИ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ....	177
<b>Лазовский Д.Н., Тур В.В., Лазовский А.Д.</b> ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО ПРИЖАТИЯ НА РАБОТУ СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МНОГОПУСТОТНЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ В ПЛАТФОРМЕННЫХ СТЫКАХ СО СТЕНАМИ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ.....	108	<b>Кузина В.В., Еремкин А.И., Пономарева И.К., Кошев А.Н.</b> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И СКОРОСТНЫХ ПОЛЕЙ В КОНВЕКТИВНЫХ ПОТОКАХ ОТ НАГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОТОПИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА .....	183
<b>Дымолазов М.А., Сабитов Л.С., Гарькина И.А.</b> ВЫЯВЛЕНИЕ РЕЗЕРВОВ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТРУКТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ .....	117	АРХИТЕКТУРА.....	192
<b>Комаров В.А., Ласьков С.Н.</b> ПРОЧНОСТЬ ПОЛОС БЕТОНА МЕЖДУ НЕПЕРЕСЕКАЮЩИМИСЯ ТРЕЩИНАМИ В СЖАТО-РАСТЯНУТЫХ ОПОРНЫХ ЗОНАХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ....	128	<b>Гарькин И.Н.</b> ИСТОРИКО-АРХИТЕКТУРНАЯ ЦЕННОСТЬ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ: МЕТОДИКА ОЦЕНКИ, ПОФАКТОРНЫЙ И ИСТОРИКО- ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ .....	192
<b>Зернов В.В., Зайцев М.Б., Агафонкина Н.В.</b> МЕТОДИКА ПРАКТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА И ПРОВЕРКИ УСТОЙЧИВОСТИ ПОПЕРЕЧНЫХ РАМ КАРКАСА СО СТУПЕНЧАТЫМИ СТОЙКАМИ С УЧЕТОМ ЕГО ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РАБОТЫ .....	135	<b>Береговой А.М.</b> ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ В ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ЗДАНИЯ.....	200
<b>Мартышкин Д.О.</b> НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МНОГОРЯДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ВКЛЕЕННЫМИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫМИ ШАЙБАМИ .....	141	<b>Селютина Л.Ф., Бочарова Е.С.</b> ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СКАТНОЙ КРЫШИ ОБЪЕКТА КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ В ПЕТРОЗАВОДСКЕ.....	206
ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ .....	153	<b>Гречишкин А.В., Антонов А.И., Гусев В.П., Жоголева О.А.</b> ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАЗОРОВ МЕЖДУ АКУСТИЧЕСКИМИ ЭКРАНАМИ И ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКРАНИРОВАНИЯ ШУМА .....	215
<b>Андреев С.Ю., Сафронов М.А., Алексеев Д.П.</b> ЗАВИСИМОСТЬ СВОЙСТВ ВОДОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ ОТ СТЕПЕНИ ДИСПЕРСНОСТИ ПУЗЫРЬКОВ ВОЗДУХА.....	153	<b>Дерина М.А., Петрянина Л.Н., Усова А.А.</b> РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОДЗЕМНЫХ ПРОСТРАНСТВ ЗДАНИЙ ПОД УКРЫТИЯ... ..	222

# Contents

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS.....	5	<b>Lazouski D.N., Tur V.V., Lazouski A.D.</b> INFLUENCE OF TRANSVERSE PRESSION ON THE PERFORMANCE OF PRECAST CONCRETE HOLLOW CORE SLABS IN PLATFORM JOINTS WITH THE WALLS OF MULTI-STORY BUILDINGS.....	108
<b>Ibragimov R.A., Korolev E.V.</b> ESTIMATION OF ENERGY CONSUMPTION FOR ACTIVATION OF MINERAL COMPONENTS IN A VORTEX LAYER APPARATUS .....	5	<b>Dymolazov M.A., Sabitov L.S., Garkina I.A.</b> STUDY OF RESERVES OF LOAD-BEARING CAPACITY OF STRUCTURAL DESIGNS.....	117
<b>Korolev E.V., Grishina A.N., Danilov A.M., Aizenshtadt A.M.</b> EVALUATION OF STRUCTURAL EFFECTS OF FORMATION OF FILM PHASE OF MATRIX MATERIAL .....	21	<b>Komarov V.A., Laskov S.N.</b> THE STRENGTH OF CONCRETE STRIPS BETWEEN NON-INTERSECTING CRACKS IN THE COMPRESSED-STRETCHED SUPPORT ZONES OF THE BENDABLE ELEMENTS .....	128
<b>Budylnina E.A., Garkina I.A., Danilov A.M.</b> METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE SYNTHESIS OF COMPLEX WEAKLY FORMALIZABLE SYSTEMS.....	35	<b>Zernov V.V., Zaitsev M.B., Agafonkina N.V.</b> THE METHOD OF PRACTICAL CALCULATION AND VERIFICATION OF THE STABILITY OF THE TRANSVERSE FRAMES OF A FRAME WITH STEPPED RACKS, TAKING INTO ACCOUNT ITS SPATIAL OPERATION .....	135
<b>Beregovoy V.A., Lavrov I.Yu., Prisevka A.S.</b> FORMATION OF A POROUS STRUCTURE AND HEAT-CONDUCTING PROPERTIES OF GLASS-CRYSTAL FILLERS.....	43	<b>Martyshev D.O.</b> STRESS-STRAIN STATE OF MULTI-ROW JOINTS OF WOODEN STRUCTURES WITH GLUED FIBERGLASS WASHERS.....	141
<b>Makridin N.I., Maksimova I.N.</b> DEFORMATION OF A LIGHT STRUCTURAL CONCRETE STRUCTURE AT UNIAXIAL COMPRESSION.....	56	ENGINEERING SYSTEMS.....	153
<b>Pinus B.I., Korneeva I.G.</b> FRACTURE TIME AS AN INDICATOR OF FATIGUE WEAR OF CEMENT COMPOSITES.....	68	<b>Andreev S.Yu., Safronov M.A., Alekseev D.P.</b> DEPENDENCE OF WATER-AIR MIXTURES PROPERTIES ON THE DISPERSION DEGREE OF AIR BUBBLES.....	153
<b>Garipov A.R., Makarov D.B., Khozin V.G., Stepanov S.V.</b> MODIFICATION OF ROOFING BITUMEN-ASBESTOS MASTICS BY FINELY DISPERSED LATEX EMULSIONS .....	75	<b>Rozhkov V.S., Knyazev V.A., Knyazev A.A.</b> NEW TECHNOLOGY FOR INTENSIFICATION THE PROCESS OF NEUTRALIZATION TREATMENT OF WASTEWATER OF GALVAN PRODUCTIONS INVOLVING THE USE OF SODIUM FERRATE OXIDIZING REAGENT.....	163
<b>Moskvin R.N., Belyakova E.A.</b> KINETIC FEATURES OF STRENGTH GROWTH OF CARBONATE-SLAG COMPOSITES ACTIVATED BY ALKALINE COMPONENTS.....	83	<b>Osipova N.N., Yakovlev D.S., Grishin B.M.</b> IMPROVING THE EFFICIENCY OF BALLOON INSTALLATIONS WHEN THEY ARE FILLED WITH LIQUEFIED PETROLIUM GAS .....	169
<b>Kuimova E.I., Zaytseva M.V., Loganina V.I., Ezerskiy V.A.</b> QUALITY ASSESSMENT OF DRY BUILDING MIXES: ADDITIVE CONVOLUTION METHOD .....	90	<b>Bakanova S.V.</b> AIR EXCHANGE IN THE STORAGE ROOMS OF PERISHABLE PRODUCTS WITH A HORIZONTAL AIR DISTRIBUTION SYSTEM .....	177
BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS.....	98		
<b>Rybakov V.A., Seliverstov A.V., Tsvetkova A.A.</b> RATIONAL PARAMETERS OF ENCLOSING LIGHTWEIGHT STEEL-CONCRETE STRUCTURES .....	98		

---

<b>Kuzina V.V., Eremkin A.I., Ponomareva I.K., Koshev A.N.</b> MATHEMATICAL MODELING OF TEMPERATURE AND VELOCITY FIELDS IN CONVECTIVE FLOWS FROM THE HEATED SURFACE OF A HEATER.....	183	<b>Selutina L.F., Bocharova E.S.</b> INFORMATION MODELING OF THE PITCHED ROOF OF A CULTURAL HERITAGE OBJECT IN PETROZAVODSK .....	206
ARCHITECTURE.....	192	<b>Grechishkin A.V., Antonov A.I., Gusev V.P., Zhogoleva O.A.</b> EVALUATION OF THE EFFECT OF GAPS BETWEEN ACOUSTIC SCREENS AND THE SUPPORT SURFACE ON THE EFFECTIVENESS OF NOISE SHIELDING.....	215
<b>Garkin I.N.</b> HISTORICAL AND ARCHITECTURAL VALUE OF ITS CULTURAL HERITAGE OBJECTS: METHOD OF EVALUATION, FACTOR-BY-FACTOR AND HISTORICAL- GENETIC ANALYSIS.....	192	<b>Derina M.A., Petryanina L.N., Usova A.A.</b> RECONSTRUCTION OF UNDERGROUND SPACES OF BUILDINGS FOR SHELTERS.....	222
<b>Beregovoy A.M.</b> FACTORS INFLUENCING ENERGY EFFICIENCY IN THE UNIFIED ENERGY SYSTEM OF THE BUILDING.....	200		

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

## BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 691.542

DOI 10.54734/20722958\_2025\_1\_5

*Казанский государственный архитектурно-строительный университет*

Россия, 420043, Казань, ул. Зеленая, 1

**Ибрагимов Руслан Абдирашитович,**

кандидат технических наук, доцент

E-mail: rusmag007@yandex.ru

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*

Россия, 190005, Санкт-Петербург,

ул. Вторая Красноармейская, д. 4,

тел.: +7 (812) 316-53-11

**Королев Евгений Валерьевич,**

доктор технических наук, профессор,

академик Российской инженерной

академии, проректор

E-mail: korolev@nocnt.ru

*Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*

Russia, 420043, Kazan, 1, Zelenaya St.

**Ibragimov Ruslan Abdirashitovich,**

Candidate of Sciences, Associate Professor

E-mail: rusmag007@yandex.ru

*St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering*

Russia, 190005, St. Petersburg,

4, Second Krasnoarmeyskaya St.,

tel: +7 (812) 316-53-11

**Korolev Evgeny Valerievich,**

Doctor of Sciences, Professor,

Academician of the Russian Academy

of Engineering, Vice-Rector

E-mail: korolev@nocnt.ru

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда  
(Russian Science Foundation) № 24-29-00524, <https://rscf.ru/project/24-29-00524/>).

## ОЦЕНКА ЭНЕРГОЗАТРАТ НА АКТИВАЦИЮ МИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ В АППАРАТЕ ВИХРЕВОГО СЛОЯ

Р.А. Ибрагимов, Е.В. Королев

Представлены результаты определения энергетического баланса процессов, протекающих в аппаратах вихревого слоя при обработке порошкообразных материалов. Энергозатраты классифицированы на 2 группы: энергозатраты на преобразования обрабатываемого вещества (группа 1) и энергозатраты на трансформацию энергии в другие её формы (группа 2). Показано, что энергозатраты первой группы, включающие в том числе энергозатраты на механомагнитную активацию поверхности частиц обрабатываемого материала, в несколько раз меньше энергозатрат второй группы. Установлено, что зависимость количества энергии, расходуемой на образование активированного слоя на поверхности вещества, имеет асимптотический характер. Такой характер зависимости определяется конкурирующим влиянием на процесс механомагнитной активации материала температуры и магнитного поля. Повышение температуры приводит к уменьшению магнитной восприимчивости материала (в соответствии с законом Кюри), что вызывает снижение интенсивности преобразования подводимой энергии в поверхностную энергию – энергию деструкции частиц и энергию преобразования поверхностных свойств материала (энергию активации). Предложен критерий эффективности обработки минеральных компонентов в измельчающих устройствах, который перспективен как для классификации различных обрабатываемых материалов по степени их податливости к

активации, так и для классификации этих устройств по их способности активировать обрабатываемый материал.

*Ключевые слова: энергетический баланс, энергозатраты, механомагнитная активация, вихревой слой, критерии эффективности, кварц*

## ESTIMATION OF ENERGY CONSUMPTION FOR ACTIVATION OF MINERAL COMPONENTS IN A VORTEX LAYER APPARATUS

R.A. Ibragimov, E.V. Korolev

This paper presents the results of determining the energy balance of the processes occurring in vortex layer devices during powder materials processing. The energy costs are classified into 2 groups: energy costs for transforming the processed substance (group 1) and energy costs for converting the energy into its other forms (group 2). It is shown that the energy costs of the first group, including energy costs for mechanomagnetic activation of the surface of particles of the processed material, are several times less than the energy costs of the second group. It is established that the dependence of the amount of energy spent on the formation of an activated layer on the surface of a substance has an asymptotic nature. This nature of the dependence is determined by the competing effects of temperature and magnetic field on the process of mechanomagnetic activation of the material. An increase in temperature leads to a decrease in the magnetic susceptibility of the material (in accordance with the Curie law), which causes a decrease in the intensity of conversion of the supplied energy into surface energy – the energy of particle destruction and the energy of transformation of the surface properties of the material (activation energy). A criterion for the efficiency of processing mineral components in grinding devices is proposed, which is promising both for classifying various processed materials according to their degree of susceptibility to activation, and for classifying these devices according to their ability to activate the processed material.

*Keywords: energy balance, energy consumption, mechanomagnetic activation, vortex layer, efficiency criteria, quartz*

**Введение.** В соответствии с комплексной государственной программой Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности», утверждённой постановлением Правительства Российской Федерации от 09.09.2023 г. №1473, предполагается «формирование условий для создания отечественных энерго-сберегающих технологий, а также создание стимулов к повышению энергетической эффективности для отечественных производителей оборудования высокой энергетической эффективности, что будет способствовать технологическому обновлению базовых секторов экономики». Строительная индустрия как самостоятельный вид деятельности в сфере строительства является одной из материало- и энергоёмких областей экономики. Современные строительные материалы – это многокомпонентные высоконаполненные дисперсные системы, для управления структурообразованием которых используются компоненты, имеющие различную дисперсность, в том числе нанометрического размера. В этой связи применение энергоэффективных способов не только повышения дисперсности, но и направленного изменения поверхностных свойств дисперсных компонентов позволит повысить энергетическую эффективность и на этапе их подготовки, и на этапах раннего структурообразования (сокращение продолжительности формирования структуры и свойств материала, затраты энергии при тепловой обработке и т.д.). Кроме того, диспергирование способствует решению задачи усреднения химического состава и свойств отходов промышленности (в том числе ранее признанных непригодными), то есть развитие экономики замкнутого цикла [1, 2].

Расход энергии является важным критерием рентабельности при выборе помольного агрегата. Так, энергопотребление – один из ключевых показателей при измельчении цементного клинкера [3, 4] или углей [5, 6] в шаровых мельницах. В [7] продемонстрирована энергоэффективность применения вертикальной валковой мельницы при измельчении портландцемента.

На практике часто эффективность измельчения оценивают по зависимости, описывающей связь между расходом энергии, необходимой для осуществления процесса

измельчения, и получаемым эффектом, чаще всего измеряемым площадью поверхности порошка. При этом механизмы разрушения, представленные в работах [8–12], различны. Так, теория Риттингера [8] предполагает, что работа, затрачиваемая при измельчении, прямо пропорциональна приросту поверхности измельчаемого материала. По мнению Кика [9], эта энергия пропорциональна объёму измельчаемого вещества. Теория поверхностного объёма [10] сочетает в себе гипотезы Риттингера и Кика. Чарльз [11] предложил объединить три теории в одну. Альтернативную формулировку энергетических гипотез предложил Джинхызыян [13]. Гипотеза Джинхызыяна, известная как термодинамическая теория измельчения, была развита Гийо [14] и Мельчарекком [15]. Влияние веществ, имеющих поверхностную активность, на прочность материала представлено в модели адсорбционного понижения прочности П.А. Ребиндера [12, 16]. Согласно термодинамической теории измельчения, энергия, подводимая в процессе измельчения, пропорциональна общему объёму материала и поверхности получаемого продукта [17]:

$$E_{ks1} = \frac{\sigma_m^2}{2E} V + \alpha (A_1 + \Delta A),$$

где  $E_{ks1}$  – начальная кинетическая энергия измельчаемого материала, Дж;  $\sigma_m$  – сжимающее напряжение, Н/м<sup>2</sup>;  $E$  – модуль Юнга, Н/м<sup>2</sup>;  $V$  – объём материала, м<sup>3</sup>;  $\alpha$  – поверхностная плотность энергии измельчения, Дж/м<sup>2</sup>;  $A_1$  – площадь поверхности материала до измельчения, м<sup>2</sup>;  $\Delta A$  – прирост общей поверхности измельчаемого материала, м<sup>2</sup>.

Весьма важной характеристикой измельчения является энергетическая эффективность измельчения  $e_d$ , имеющая единицу измерения – т/(кВт·ч):

$$e_d = \frac{q_d}{N_v},$$

где  $q_d$  – удельная производительность мельницы по вновь образованному расчётному классу крупности, т/(м<sup>3</sup>·ч);  $N_v$  – удельная мощность, потребляемая двигателем мельницы, кВт/м<sup>3</sup>.

При  $N_v = \text{const}$  энергетическая эффективность измельчения пропорциональна удельной производительности помольного агрегата [18]. Оценкой эффективности измельчения может служить энергонапряжённость мельницы – количество энергии, передаваемой мелющими телами порошку в единицу времени [19]:

$$W = E_t n,$$

где  $E_t = \frac{mv^2}{2} q$  – тепловая энергия мелющего тела (здесь  $q$  – коэффициент теплоотдачи);  $n$  – среднее число соударений всех мелющих тел.

В [20] общая энергия на измельчение состоит из энергетических затрат на разрушение междучастичных связей, сообщение кинетической энергии мелющим телам, трение, динамические потери и т.д. В то же время отмечается, что коэффициент использования подведённой к материалу энергии не превышает 0,24 % [21]. Установлено [22–23], что величина энергии, расходуемой на измельчение, в основном зависит от энергии поверхностного взаимодействия (зернистости сырья) и прочности измельчаемого материала.

В управлении структурообразованием строительных материалов на этапе формирования структуры и свойств важное значение имеет активность поверхности дисперсных компонентов [24–26], которая при прочих равных условиях зависит от степени аморфизации поверхностного слоя. Как правило, эта характеристика, играющая



важную роль в технологии строительных материалов, не учитывается. Поэтому представляет определённый интерес как установление зависимости между количеством активированного вещества и структурно-чувствительными свойствами материала, так и определение доли энергии, расходуемой на активацию поверхности частиц материала, в общем энергетическом балансе процессов обработки в помольных агрегатах. Эту величину можно использовать в качестве дополнительного критерия при их выборе [27] и классификации.

**Материалы и методы исследования.** В данной работе рассматривается механомагнитная обработка порошковых минеральных материалов, под которой понимается обработка дисперсного материала в помольном агрегате, приводящая к увеличению его дисперсности и изменению поверхностных свойств под совместным влиянием электромагнитного поля и динамической механической нагрузки. Механомагнитную обработку осуществляли в аппарате вихревого слоя (АВС). Оценку энергозатрат на активацию минеральных компонентов в АВС проводили на модельной системе, состоящей из минерального компонента и ферромагнитных тел, обеспечивающих механическое воздействие на частицы обрабатываемого материала.

**Характеристики минерального компонента:** кварцевый песок Камско-Устьинского месторождения (Россия, Республика Татарстан); истинная плотность  $2600 \text{ кг/м}^3$ , насыпная плотность –  $1653 \text{ кг/м}^3$ , удельная теплоёмкость кварца –  $750 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ .

**Характеристики ферромагнитных тел:** вид – стальные цилиндры; диаметр –  $2,5 \text{ мм}$  и длина –  $25 \text{ мм}$ ; площадь поверхности всех ферромагнитных тел –  $0,0258 \text{ м}^2$ .

**Характеристики аппарата вихревого слоя (АВС):** модель 297, производитель ООО «Регионметтранс»; материал нагреваемых элементов АВС – сталь; масса нагреваемых элементов –  $86 \text{ кг}$ , а их площадь –  $0,41 \text{ м}^2$ ; удельная теплоёмкость стали –  $468 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ .

Соотношение масс кварцевого песка (порошка) и ферромагнитных тел для обработки в АВС было принято  $2,5 : 1$  (масса кварцевого порошка составляла  $0,3 \text{ кг}$ ). Экспериментально было установлено изменение следующих свойств кварцевого порошка после заданной продолжительности обработки в АВС:

- площадь поверхности кварцевого порошка: методом воздухопроницаемости определяли на приборе ПСХ-9 [28], а методом БЭТ – на анализаторе Nova 1200e Quantachrome [29];
- поверхностное натяжение кварца определяли методом «сидячей капли» на приборе Kruss FM40Mk2 EasyDrop при температуре  $(22 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$  [30];
- количество воды, испарившейся из кварцевого порошка, находили по формуле  $\Delta m = m_1 - m_2$ , где  $m_1$  и  $m_2$  – масса порошка до и после обработки;
- температуры кварцевого порошка, ферромагнитных тел и рабочей камеры АВС измеряли пирометром TemPro 300, имеющим диапазон измерений температуры – от минус  $32$  до  $+350 \text{ }^\circ\text{C}$ , точность измерений  $\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Уравнение энергетического баланса процессов в АВС и методика определения энергозатрат.**

Общая энергия  $E_{\text{АВС}}$ , затрачиваемая на механомагнитную обработку материала в АВС, состоит из потребляемой мощности  $W_0$  аппарата с учётом КПД его работы и продолжительности обработки  $t$ :

$$E_{\text{АВС}} = KW_0t,$$

где  $W_0$  – потребляемая мощность асинхронного двигателя (являющегося электрическим двигателем без ротора) и блока управления параметрами работы аппарата вихревого слоя;  $K$  – КПД асинхронных двигателей, учитывающий потери на вихревые электрические токи, нагрев обмоток статора. Для двигателей мощностью до  $5 \text{ кВт}$  (потребляемая мощность АВС, используемого в настоящей работе)  $K = 0,85$  [31].

Составляющие общей энергии, затрачиваемой на процессы механомагнитной обработки в АВС:

- кинетическая энергия движущихся частиц;
- энергия разрушения частиц;
- тепловая энергия частиц, разогревающихся в процессе столкновения, трения и разрушения;
- тепловая энергия, расходуемая на нагрев корпуса помольного агрегата;
- энергия, переносимая в результате теплового излучения от нагретых частей АВС, обрабатываемого порошка и ферромагнитных тел;
- энергия испарения воды, содержащейся в обрабатываемом порошке;
- другие виды энергии – неучтённые потери.

Энергозатраты каждого из указанных процессов можно агрегировать в две группы:

группа 1 – энергозатраты на преобразования обрабатываемого вещества;

группа 2 – энергозатраты на трансформацию энергии в другие её формы.

Подробно рассмотрим данные группы и слагаемые, в них входящие.

**Для первой группы энергозатрат** характерны следующие составляющие:

1. Энергия разрушения частиц материала  $E_{dest}$ , величину которой можно оценить по изменению дисперсности частиц обрабатываемого материала:

$$E_{dest} = \sigma_{f,0} \cdot S_f,$$

где  $\sigma_{f,0}$  – поверхностное натяжение обрабатываемого материала до механомагнитной обработки;  $\Delta S_f$  – приращение площади поверхности после механомагнитной обработки.

На практике площадь удельной поверхности обрабатываемого минерального компонента при определении  $E_{dest}$  достаточно определять по методу Блейна [28], а величину  $\Delta S_f$  – с учётом массы материала  $m_f$  и продолжительности обработки в АВС:

$$\Delta S_f = m_{f,i} (S_{ud}(t_i) - S_{ud}(t_{i-1})),$$

где  $S_{ud}$  – удельная площадь поверхности минерального компонента (материала) по методу Блейна;  $t$  – продолжительность обработки.

2. Энергия  $E_{sl}$ , расходуемая на преобразование поверхностного слоя частиц обрабатываемого материала. Это преобразование приводит к формированию на поверхности частиц вещества (активированного вещества), обладающего отличающимися поверхностными свойствами и способного влиять на процессы структурообразования строительного материала. Изменение поверхностных свойств может оказывать значительное влияние на различные процессы. Для строительного материаловедения значимым можно назвать изменение контактного взаимодействия на границе фаз «поверхностный слой обработанного материала – жидкая фаза», в частности:

- изменение краевого угла смачивания  $\Delta\theta$ ;
- скорости растворения вещества частицы  $\Delta\vartheta_r$ .

Одновременно с этим происходит образование поверхностных трещин, сколов и других поверхностных дефектов, которые увеличивают шероховатость поверхности, что в соответствии с законом Венцеля – Дерягина [32] может существенно влиять на величину краевого угла смачивания:

$$\cos(\theta)_{ш} = k_{ш} \cos(\theta)_0,$$

где  $k_{ш}$  – коэффициент шероховатости; индексами «ш» и «0» обозначены шероховатая и гладкая поверхность, соответственно.

Оценку  $E_{sl}$  можно проводить по величине изменения краевого угла смачивания:

$$E_{sl} = \sigma_l \cdot S_{ff} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1),$$

где  $\sigma_l$  – поверхностное натяжение жидкости (воды);  $\Delta S_{ff}$  – изменение площади поверхности частиц;  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – краевые углы смачивания до и после механомагнитной обработки.

Кроме этого подхода оценку  $E_{sl}$  можно проводить по величине изменения поверхностного натяжения обрабатываемого материала:

$$E_{sl} = |\sigma_{f,2} - \sigma_{f,1}| \cdot S_{ff},$$

где  $\sigma_{f,1}$  и  $\sigma_{f,2}$  – поверхностное натяжение обрабатываемого материала до и после механомагнитной обработки.

В отличие от  $E_{dest}$ , для определения которой использовано изменение дисперсности частиц  $\Delta S_f$ , для оценки  $E_{sl}$  необходимо использовать площадь поверхности частиц, включающую поверхностные дефекты. Экспериментально эту величину можно определить по методу БЭТ [29]. Изменение площади поверхности частиц также вычисляется с учётом массы материала  $m_f$  и продолжительности обработки в АВС:

$$\Delta S_{ff} = m_{f,i} (S_{ud,f}(t_i) - S_{ud,f}(t_{i-1})),$$

где  $S_{ud,f}$  – удельная площадь поверхности минерального материала по методу БЭТ;  $t$  – продолжительность обработки.

В данной работе использовали второй способ оценки  $E_{sl}$ . Результаты определения поверхностного натяжения, удельной поверхности в зависимости от продолжительности обработки представлены в работе [30].

3. Энергия  $E_{\Delta W}$ , расходуемая на изменение вещественного состава обрабатываемого материала, в частности на изменение его влажности. Очевидно, что величина этой энергии зависит от количества испарившейся жидкости и удельной теплоты парообразования этой жидкости:

$$E_{\Delta W} = (m_{f,1} - m_{f,2})L,$$

где  $m_{f,1}$  и  $m_{f,2}$  – масса обрабатываемого материала до и после механомагнитной обработки.;  $L$  – удельная теплота парообразования (для воды  $L = 2,3$  МДж/кг [33]).

Для **второй группы энергозатрат** характерны следующие составляющие:

1. Энергия  $E_Q$ , расходуемая на нагрев смеси, состоящей из обрабатываемого материала и ферромагнитных тел:

$$E_Q = \sum_i^n C_{m,i} m_i \Delta T,$$

где  $C_{m,i}$  – удельная теплоёмкость  $i$ -го компонента смеси;  $m_i$  – масса  $i$ -го компонента смеси;  $\Delta T$  – величина нагрева, равная разнице температур до и после обработки смеси в АВС.

2. Энергия  $E_q$ , расходуемая на нагрев корпуса АВС:

$$E_q = C_m M \Delta T,$$

где  $C_m$  – удельная теплоёмкость материала корпуса АВС;  $M$  – масса корпуса, подвергаемого нагреву;  $\Delta T$  – величина нагрева корпуса АВС, равная разнице температур до и после работы АВС.

3. Энергия  $E_I$ , переносимая в результате теплового излучения от нагретых частей ABC. Энергетическая светимость нагретого тела  $j^*$  описывается законом Стефана – Больцмана:

$$j^* = \sigma T^4$$

( $\sigma = 5,670367 \cdot 10^{-8}$  Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-4</sup> – постоянная Стефана – Больцмана;  $T$  – температура нагрева, К), из которого  $E_I$  равна:

$$E_I = j^* S_{ABC} t,$$

где  $S_{ABC}$  – площадь нагретых частей ABC;  $t$  – продолжительность обработки, с.

4. Энергия  $E_{I(p)}$ , характеризующая потери излучения, генерируемого обрабатываемым материалом и ферромагнитными телами, в окружающую среду.

Энергия излучения, генерируемая обрабатываемым материалом и ферромагнитными телами в соответствии с законом Стефана – Больцмана и составом смеси, равна:

$$E_{I(m)} = \sigma T^4 t (m_f(t) S_f(t) + m_{fb} S_{fb}),$$

где  $S_{fb}$  и  $m_{fb}$  – удельная площадь поверхности ферромагнитных тел и их масса;  $S_f(t)$  и  $m_f(t)$  – удельная площадь поверхности и масса обрабатываемого материала;  $t$  – продолжительность обработки.

Генерируемая энергия излучения расходуется на все ранее представленные процессы (нагрев и изменение влажности обрабатываемого порошка, нагрев и потери тепла от открытых частей ABC). Конструктивные особенности ABC позволяют предположить, что часть энергии  $E_{I(m)}$  излучается в окружающую среду. Отсюда энергию потерь  $E_{I(p)}$  можно представить в виде:

$$E_{I(p)} = k_p E_{I(m)},$$

где  $k_p$  – среднее значение коэффициента потерь, которое вычисляется по формуле

$$k_p = \frac{1}{N} \sum 1 - \left( \frac{E_I(t) + E_{\Delta W}(t) + E_Q(t) + E_q(t) + k_l E_{I(m)}}{E_{I(m)}} \right),$$

где  $k_l$  – коэффициент, учитывающий долю энергии излучения, расходуемую на нагрев и трансформацию энергии;  $N$  – количество изменений параметров процесса обработки материала.

Коэффициент  $k_l$  можно определить только при решении обратной задачи, поэтому величину коэффициента  $k_p$  в данной работе вычисляли с учётом геометрических характеристик рабочей камеры ABC:

$$k_p = \delta S_{op} \left( \frac{R_0}{R_0 + H} \right)^2,$$

где  $\delta S_{op}$  – доля открытой поверхности ABC, через которую происходит потеря энергии излучения;  $R_0$  – радиус рабочей зоны ABC, в которой происходит обработка материала;  $H$  – расстояние до открытой поверхности ABC.

С учётом  $\delta S_{op} = 11\%$ , а  $H = 0,25R_0$  коэффициент  $k_p = 7\%$ .

5. Кинетическая энергия  $E_k$  частиц обрабатываемого материала и ферромагнитных тел:

$$E_k = \frac{(m_f(t) + m_{fb}) \bar{v}^2}{2},$$

где  $m_f$  и  $m_{fb}$  – массы частиц обрабатываемого материала и ферромагнитных тел;  $\bar{v}$  – средняя скорость движения частиц обрабатываемого материала и ферромагнитных тел.

Скорость  $\bar{v}$ , по разным оценкам, не превышает 50 м/с. Отсюда с учётом соотношения  $m_f : m_{fb} = 2,5 : 1$  и принятия  $m_f(0) = 0,3$  кг кинетическая энергия  $E_k = 525$  Дж.

6. Прочие виды энергии (неучтённые потери). Эти потери возникают при протекании различных процессов, которые затруднительно количественно оценить. К ним можно отнести потери тепла в основание АВС и энергию, затрачиваемую на упругие и пластические деформации в веществе обрабатываемого материала. Кроме того, к потерям можно отнести совокупные погрешности измерения физических характеристик обрабатываемого материала и АВС, используемые для определения количеств соответствующих видов энергий.

Очевидно, что потери тепла в основание, на котором установлен АВС, будут возрастать в соответствии с законом Фурье с ростом нагрева АВС. На количество передаваемой энергии значительное влияние будут оказывать площадь контакта и теплофизические свойства контактирующих элементов АВС и основания. Отсюда в первом приближении можно представить этот вид потерь в виде прямо пропорциональной зависимости, зависящей от продолжительности обработки и мощности АВС (рис. 1, зависимость «Процесс 1»).

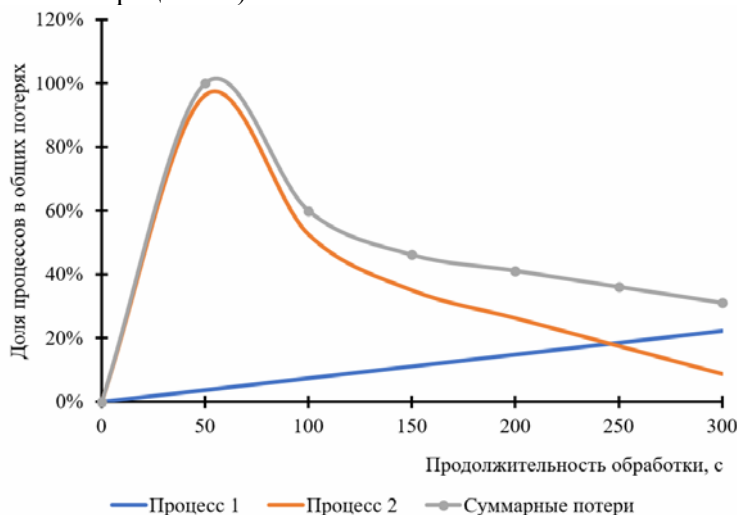


Рис. 1. Кинетика изменения неучтённых потерь

Второй процесс потерь (рис. 1, зависимость «Процесс 2») имеет нелинейный характер, выраженный природой процесса обработки и распределения энергии на деструкцию, трансформацию вещества поверхностного слоя частиц обрабатываемого материала и его нагрев, а также влиянием магнитного поля. Естественно предположить, что только малая доля актов столкновения ферромагнитных тел с частицами обрабатываемого материала приводит к их деструкции. Большинство таких столкновений приводит к возбуждению упругих колебаний в кристаллической структуре вещества, а воздействие магнитного поля – к накоплению дислокаций и последующим пластическим деформациям, которые при преодолении критического порога вызывают образование трещин. Упругие колебания кристаллической решётки, возникшие в поверхностном слое, фиксируются повышением температуры. При этом для наступления теплового равновесия во всем объёме частицы требуется время. Поэтому данный процесс потерь имеет экстремум в начальный период обработки материала.

С учётом изложенного количество потерь будет равно:

$$e_{los}(t) = KW_0 C_q(t)t,$$

где  $C_q(t)$  – коэффициент потерь.

Вычислить величину потерь  $e_{los,i}$  можно из уравнения энергетического баланса, имеющего вид:

$$E_{ABC} = E_{dest} + E_{sl} + E_{\Delta W} + E_Q + E_q + E_I + E_{I(p)} + E_{\kappa} + e_{los},$$

а именно:

$$e_{los}(t) = E_{ABC}(t) - \sum E_i,$$

где  $\sum E_i = E_{dest}(t) + E_{sl}(t) + E_{\Delta W}(t) + E_Q(t) + E_q(t) + E_I(t) + E_{I(p)}(t) + E_{\kappa}$ .

Энергия  $e_{los}(t)$  имеет сложную зависимость, которую, вероятно, можно объяснить следующим образом. В начальный период при столкновении тел и частиц возникают упругие колебания кристаллических решёток, что частично фиксируется повышением температуры. По мере разогрева эти соударения с ферромагнитными телами и другими частицами приводят не только к дальнейшему разогреву, но и к развитию пластических деформаций, в результате которых наблюдаются рост дисперсности частиц и изменение свойств их поверхности. Отсюда очевидно, что вклад упругих колебаний кристаллических решёток будет весомым только на начальном этапе обработки материала. Далее доля этого вида энергии будет снижаться из-за её трансформации в другие виды энергии, указанные во второй группе энергозатрат.

Для оценки эффективности обработки минеральных компонентов в различных помольных агрегатах разработано несколько критериев. Наиболее часто используют следующие:

1) коэффициент размолоспособности  $KP$ , м<sup>2</sup>/мин [34]:

$$KP = (S_2 - S_1)m / (t_2 - t_1),$$

где  $S_1$  – удельная площадь поверхности в начальное время  $t_1$ ;  $S_2$  – удельная площадь поверхности через определённое время помола  $t_2$ ;  $m$  – масса измельчаемого материала, кг;

2) удельные энергозатраты ( $\Theta$ , кВт·ч/м<sup>2</sup>) на прирост удельной площади поверхности  $\Delta S$ , произошедший за время  $\Delta t$ :

$$\Theta = \frac{N\Delta t}{m\Delta S},$$

где  $N$  – мощность электродвигателя, кВт.

Представленные критерии являются интегральными, не позволяющими проводить оценку активации поверхности обрабатываемого материала. Для преодоления этого ограничения предлагается дополнительный критерий энергоэффективности, лишённый недостатков известных критериев.

Критерием энергоэффективности активации минеральных материалов является величина, которая учитывает все процессы, изменяющие как характеристики, так и состав обрабатываемого материала. К таким составляющим относятся:

- энергия разрушения частиц материала  $E_{dest}$ ;
- энергия, расходуемая на преобразование поверхностного слоя частиц обрабатываемого материала  $E_{sl}$ ;
- энергия, расходуемая на изменение влажности обрабатываемого материала  $E_{\Delta W}$ ;
- второй процесс потерь  $e_{los,2}$ .

Отсюда коэффициент энергоэффективности обработки минерального материала равен:

$$K_{Pef} = \frac{E_{dest} + E_{sl} + E_{\Delta W} + e_{los,2}}{E_{ABC}}.$$

Значимой характеристикой эффективности обработки материала является достижение максимальной дисперсности  $S_f$  и активности поверхности при минимальной продолжительности обработки  $t$ . Эту характеристику можно представить в виде:

$$K_t = \frac{S_f}{t}.$$

Представленные частные критерии эффективности могут применяться для сопоставления эффективности обработки и классификации различных минеральных материалов или анализа эффективности различных аппаратов для механо- или механомагнитной обработки. Видится, что интегральная оценка, базирующаяся на указанных частных критериях, является предпочтительной. Такой критерий эффективности будет иметь вид:

$$K_{IE} = K_i K_{Pef} = \left( \frac{S_f}{t} \right) \left( \frac{E_{dest} + E_{sl} + E_{\Delta W} + e_{los,2}}{E_{ABC}} \right).$$

Критерии эффективности  $K_i$  и  $K_{IE}$  имеют единицы измерения, равные м<sup>2</sup>/мин, что характеризует скорость роста площади удельной поверхности частиц обрабатываемого материала. Введение в критерий  $K_{Pef}$  величины  $E_{sl}$  предопределяет вид удельной площади поверхности, а именно удельную площадь поверхности, определённую методом БЭТ. Кроме того, в формуле для вычисления  $K_{IE}$  критерий эффективности  $K_{Pef}$  выполняет функцию понижающего коэффициента, влияние которого зависит от величины числителя этой дроби; при прочих равных условиях, чем выше эта величина, тем эффективнее активация обрабатываемого материала.

**Результаты и их обсуждение.** Энергия  $E_{ABC}$  линейно увеличивается от продолжительности работы ABC, при этом другие составляющие энергетического баланса имеют нелинейный асимптотический характер, который удовлетворительно описывается функцией вида:

$$y(t) = y_{max} (1 - \exp(-bt^n)),$$

где  $y_{max}$  – максимальная величина анализируемого свойства / характеристики процессов в ABC;  $t$  – продолжительность обработки в ABC;  $b, n$  – эмпирические коэффициенты (см. таблицу).

Из данных, представленных в таблице, видно, что величины коэффициента  $n$ , как правило (за исключением изменения поверхностного натяжения  $\sigma$ ),  $n > 1$ , что указывает на повышение интенсивности изменения анализируемого свойства обрабатываемого материала с увеличением продолжительности его обработки в ABC.

Эмпирические коэффициенты зависимости  $y(t) = f(t)$

Свойство / энергозатраты	Эмпирические коэффициенты		
	$y_{max}$	$b$	$n$
$S_f$ (по Блейну), м <sup>2</sup> /кг	106	$7,45 \cdot 10^{-3}$	1,116
$S_f$ (по БЭТ), м <sup>2</sup> /кг	10060	$3,08 \cdot 10^{-3}$	1,249
$\sigma$ , Дж/м <sup>2</sup>	1,88	$5,93 \cdot 10^{-2}$	0,753
$T$ , °С	93	$7,045 \cdot 10^{-3}$	1,102
$E_{dest}$ , Дж	26	$3,41 \cdot 10^{-3}$	1,235
$E_{sl}$ , кДж	5,66	$1,11 \cdot 10^{-3}$	1,409
$E_{\Delta W}$ , кДж	31,28	$6,42 \cdot 10^{-5}$	1,886
$E_Q$ , кДж	19,68	$1,85 \cdot 10^{-3}$	1,295
$E_q$ , кДж	520,00	$5,0 \cdot 10^{-4}$	1,423
$E_I$ , кДж	700,00	$1,83 \cdot 10^{-4}$	1,094
$E_{I(p)}$ , МДж	11,05	$7,15 \cdot 10^{-6}$	2,175

Примечание. Обозначения свойств и энергозатрат представлены в тексте.

Из рассмотренных энергозатрат наиболее интенсивно изменяются такие составляющие энергетического баланса, как  $E_{I(p)}$  и  $E_{\Delta W}$ , затем (средние по интенсивности) –  $E_q$  и  $E_{sl}$  и наименее интенсивно изменяющиеся –  $E_I$ ,  $E_{dest}$  и  $E_Q$ .

Общее количество энергии, израсходованное на обработку порошка кварцевого песка за время обработки 300 с, равно 1275 кДж. Распределение этой энергии в АВС по первой и второй группам энергозатрат различно и имеет неравномерный характер (рис. 2). Данные рис. 2 демонстрируют, что:

1) энергия, затрачиваемая на трансформацию вещества (группа 1), имеет экстремальный характер и уменьшается с увеличением продолжительности обработки. Так, доля данной группы энергозатрат снижается с 41 % после 60 с обработки в АВС до 5,5 % после 300 с обработки;

2) доля энергозатрат на трансформацию энергии в другие виды энергии (группа 2) постоянно увеличивается. Однако после 60 с обработки минерального материала в АВС наблюдается снижение интенсивности увеличения этой группы энергозатрат.

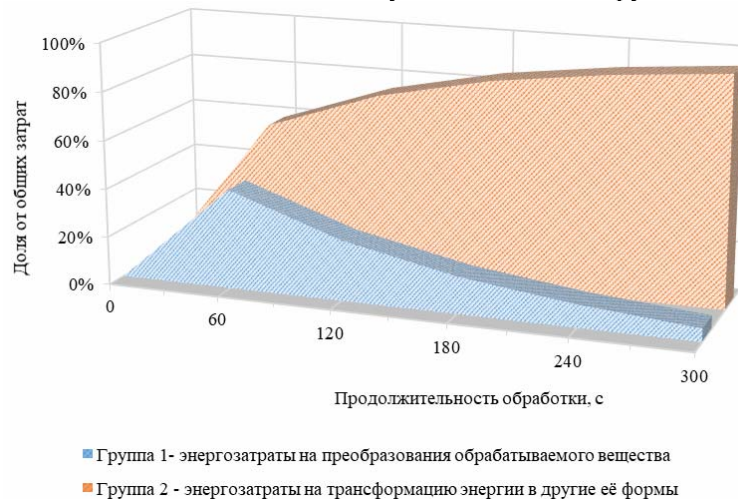


Рис. 2. Кинетика изменения доли первой группы и доли второй группы энергозатрат от продолжительности обработки материала в АВС

В каждой группе энергозатрат их составляющие также имеют нелинейный характер изменения в зависимости от продолжительности обработки в АВС (рис. 3).

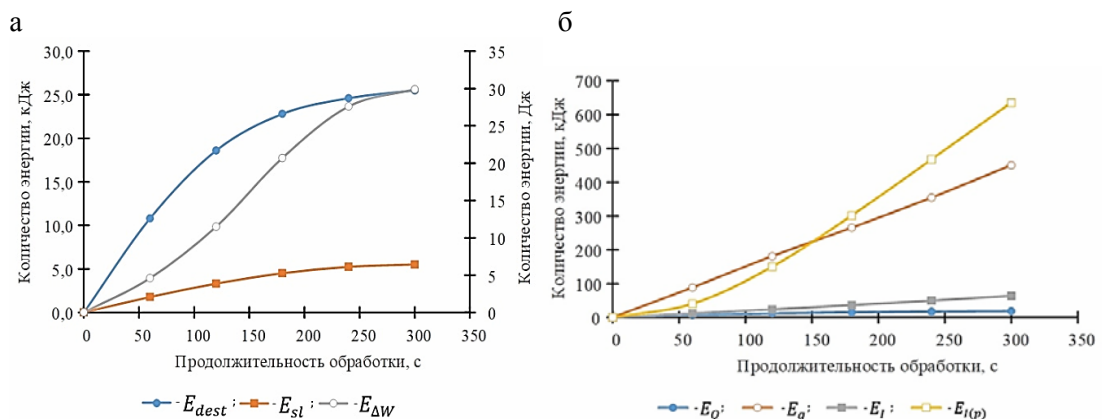


Рис. 3. Доли энергий в структуре групп энергозатрат:  
а – первая группа; б – вторая группа

Из данных, представленных на рис. 3, следует, что составляющие первой группы энергозатрат в несколько раз (а некоторые составляющие на порядки величины энергии) меньше составляющих второй группы энергозатрат. Процесс деструкции частиц обрабатываемого материала является наименее энергоёмким процессом. В общей структуре энергетического баланса его доля составляет менее 0,05 %. Наиболее энергоёмким компонентом энергетического баланса является тепловая энергия  $E_{l(p)}$ , излучаемая через открытую поверхность АВС. Доля этого вида энергии может суммарно составлять 48 %.



Важным аспектом является возрастающий характер изменения зависимости количества энергии  $E_{sl}$ , расходуемой на образование слоя активированного вещества на поверхности частиц. Зависимость этой энергии от продолжительности обработки в АВС имеет асимптотический характер. Такое поведение связано с конкурирующим влиянием температуры и магнитного поля. В процессе обработки в АВС температура обрабатываемого материала возрастает (см. таблицу), что в соответствии с законом Кюри приводит к уменьшению магнитной восприимчивости материала. Это повышает сопротивляемость обрабатываемого материала к силовым нагрузкам [35], а следовательно, к замедлению изменений энергий  $E_{dest}$  и  $E_{sl}$  от продолжительности обработки в АВС.

Эффективность АВС по критерию  $K_{IE}$  для кварцевого песка после 5 минут обработки равна 107,7 м<sup>2</sup>/мин. При этом в данном критерии учтены все виды энергии, которые приводят к преобразованию обрабатываемого материала, т.е. к его активации. Очевидно, что этот критерий эффективности можно использовать как дополнительный как для классификации различных обрабатываемых материалов по степени их податливости к активации при обработке в определённом виде мельницы, так и для классификации мельниц по их способности активировать обрабатываемый материал.

#### **Заключение.**

1. На основе процессов, протекающих в АВС при обработке порошкообразного материала, предложено уравнение энергетического баланса и представлен способ расчёта его составляющих. Все составляющие уравнения энергетического баланса классифицированы на две группы: энергозатраты на преобразования обрабатываемого вещества и энергозатраты на трансформацию энергии в другие её формы. Анализ, проведённый по данным, полученным при обработке кварцевого порошка в АВС, показал, что составляющие первой группы энергозатрат в несколько раз меньше составляющих второй группы энергозатрат. Наиболее энергоёмким компонентом энергетического баланса является тепловая энергия  $E_{I(p)}$  (до 48 %), а наименее энергоёмким – процесс деструкции частиц обрабатываемого материала (менее 0,05 %). Важно отметить возрастающий характер изменения зависимости количества энергии, расходуемой на образование активированного слоя на поверхности частиц. Эта зависимость имеет асимптотический характер, связанный с конкурирующим влиянием на процесс механомагнитной активации температуры и магнитного поля. Повышение температуры в процессе обработки приводит к уменьшению магнитной восприимчивости материала (в соответствии с законом Кюри), что вызывает снижение интенсивности преобразования подводимой в АВС энергии в поверхностную энергию – энергию деструкции частиц и энергию преобразования поверхностных свойств материала (энергию активации). Такой характер изменения энергий деструкции и образования активированного слоя указывает как на протекание интенсивных процессов при обработке материала в АВС, так и на наличие предела эффективности АВС. Из полученных данных следует, что максимальная продолжительность обработки материалов, по свойствам близких к кварцу, в АВС с указанными техническими характеристиками не должна превышать 5 минут.

2. Предложен дополнительный критерий эффективности механомагнитной обработки (активации) минеральных материалов в помольных агрегатах. В данном критерии учтены все виды энергии, которые приводят к преобразованию вещества обрабатываемого материала, т.е. к его активации. Этот критерий перспективен как для классификации различных обрабатываемых материалов по степени их податливости к активации при обработке в определённом виде помольного агрегата, так и для классификации этих устройств по их способности активировать обрабатываемый материал.

#### **Список литературы**

1. Alhawari, O. Insights from Circular Economy Literature: A Review of Extant Definitions and Unravelling Paths to Future Research / O. Alhawari, U. Awan, M. Bhutta, S. Khurram, M.A. Ülkü // Sustainability. – 2021. – №13. – 859 p.

2. Velenturf, A.P.M. Principles for a sustainable circular economy / A.P.M. Velenturf, P. Purnell // *Sustain. Prod. Consum.* – 2021. – №27. – P.1437–1457.
3. Romanovich, A.A. Determination of rational parameters for process of grinding materials pre-crushed by pressure in ball mill / A.A. Romanovich, L.G. Romanovich, E.I. Chekhovskoy // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* – 2018. – 327. – 042091.
4. Ciobanu, C. Determination of granulometrical composition of the clinker by grinding in a ball mill to determine the specific consumption of additional energy / C. Ciobanu, P. Tudor, G.-A. Constantin, G. Musuroi // *E3S Web Conf.* – 2020. – 180. – 04007.
5. Duan, J. Grinding behaviors of components in heterogeneous breakage of coals of different ash contents in a ball-and-race mill / J. Duan, Q. Lu, Z. Zhao, X. Wang, Y. Zhang, J. Wang, B. Li, W. Xie, X. Sun, X. Zhu // *Minerals.* – 2020. – 10. – 230.
6. Yang, Y. Effect of moisture on energy-size reduction of lignite coal in Hardgrove mill / Y. Yang, Y. He, X. Bi, J.R. Grace, H. Wang, F. Fotovat, W. Xie, S. Wang // *Fuel.* – 2020. – 270. – 117477.
7. Pareek, P. Review on vertical roller mill in cement industry & its performance parameters / P. Pareek, V.S. Sankhla // *Mater. Today Proc.* 2021. in press.
8. Rittinger, P.R. *Lehrbuch der Aufbereitungskunde in Ihrer Neuesten Entwicklung und Ausbildung* / P.R. Rittinger. – Germany. Berlin: Ernst und Korn, 1867.
9. Kick, F. Contributions to the knowledge of the mechanics of brittle materials / F. Kick // *Dinglers Polytech.* – 1883. – 247. – P.1–5.
10. Bond, F.C. The third theory of comminution / F.C. Bond // *AIME Trans.* – 1952. – 193. – P.484–494.
11. Charles, R.J. High velocity impact in comminution / R.J. Charles // *Min. Eng.* – 1956. – 8. – P.1028–1032.
12. Ребиндер, П.А. Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения / П.А. Ребиндер, Е.Д. Щукин // *Успехи физических наук.* – 1972. – Т. 108, № 1. – С. 1.
13. Djingheuzian, L.E. A study of present day grinding / L.E. Djingheuzian // *Can. Min. Metall. Bull.* – 1949. – 42. – P.243–257.
14. Guillot, R. *Le Problème du Broyage et Son Evolution* / R. Guillot; Edit Gauthier. – Switzerland. Villars, 1960.
15. Mielczarek, E. *Free Comminution of Brittle Solid Substances* / E. Mielczarek. – Poland: Czestochowa: Czestochowa University of Technology Press, 1982.
16. Щукин, Е.Д. Образование новых поверхностей при деформировании и разрушении твердого тела в поверхностно-активной среде / Е.Д. Щукин, П.А. Ребиндер // *Коллоидный журнал.* – 1958. – Т. 20, № 5. – С. 645.
17. Urbaniak, D. Research on the Grinding Energy Density in a Jet Mill / D. Urbaniak, H. Otwinowski, T. Wyleciał, V.P. Zhukov, A.Y. Barochkin, J. Boryca. – DOI 10.3390/ma14082008 // *Materials.* – 2021. – 14. – 2008.
18. Malyarov, P. Mineral raw material disintegration mechanisms in ball mills and distribution of grinding energy between sequential stages / P. Malyarov, O. Dolgov, P. Kovalev. – DOI 10.33271/mining14.02.025 // *Mining of Mineral Deposits.* – 2020. – Vol. 14, No. 2. – P. 25–33.
19. Милюкова, И.В. Агломерационные пределы процесса измельчения кварцевого порошка на планетарной мельнице АГО-2 с оптимальной энергонапряженностью / И.В. Милюкова, С.В. Собянин. – DOI 10.17816/byusu20180441-48 // *Вестник Югорского государственного университета.* – 2018. – № 4(51). – С. 41–48.
20. Заднепровский, Р.П. Энергетика измельчения материалов различного физического состояния / Р.П. Заднепровский // *Сухие строительные смеси.* – 2013. – № 5. – С. 14–18.
21. Винокуров, В.Р. Расчет энергетической эффективности центробежной мельницы ЦМБУ-800 / В.Р. Винокуров, Е.С. Львов // *Фундаментальные исследования.* – 2015. – № 12–6. – С. 1103–1106.

22. Urbaniak, D. Research on the grinding energy density in a jet mill / D. Urbaniak, H. Otwinowski, T. Wyleciał, V.P. Zhukov, A.Y. Barochkin, J. Boryca. – DOI 10.3390/ma14082008 // *Materials*. – 2021. – 14 (8). – Art. no. 2008.
23. Хозин, В.Г. Экологический рейтинг «карбонатных» цементов низкой водопотребности и бетонов на их основе / В.Г. Хозин, О.В. Хохряков, Р.В. Козлов. – DOI 10.52409/20731523\_2021\_2\_60 // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2021. – № 2(56). – С. 60–66.
24. Соломатов, В.И. Пути активации наполнителей композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов, Л.И. Дворкин, И.М. Чудновский // *Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура*. – 1987. – № 1. – С. 61.
25. Данилов, В.Е. Особенности расчета свободной энергии поверхности на основе модели межфазного взаимодействия Оунса-Вендта-Рабея-Къельбле / В.Е. Данилов, Е.В. Королев, А.М. Айзенштадт, В.В. Строкова. – DOI 10.31659/0585-430X-2019-776-11-66-72 // *Строительные материалы*. – 2019. – № 11. – С. 66.
26. Айзенштадт, А.М. Физико-химические трансформации сапонитсодержащего материала при его активации измельчением / А.М. Айзенштадт, В.В. Строкова, В.В. Нелюбова [и др.]. – DOI 10.30791/0015-3214-2024-1-53-64 // *Физика и химия обработки материалов*. – 2024. – № 1. – С. 53–64.
27. Ибрагимов, Р.А. Прочность композитов на основе модифицированного портландцемента, активированного в аппарате вихревого слоя / Р.А. Ибрагимов, Е.В. Королев. – DOI 10.33622/0869-7019.2021.01.35-41 // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2021. – № 1. – С. 35–41.
28. Бикбау, М.Я. Развитие технологии бетонов с применением наноцементов и дисперсных заполнителей / М.Я. Бикбау, А.С. Нефедов, Е.В. Панкратова // *Технологии бетонов*. – 2023. – № 4(189). – С. 55–63.
29. Носенко, А.А. Методы и устройства для измерения удельной поверхности дисперсных материалов / А.А. Носенко, С.И. Половнева. – DOI 10.21285/2227-2925-2017-7-2-113-121 // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. – 2017. – Т. 7, № 2(21). – С. 113–121.
30. Ибрагимов, Р.А. Краевые углы смачивания порошков кварца и каустического доломита после механомагнитной обработки / Р.А. Ибрагимов, Е.В. Королев, Ю.В. Бикаева, И.С. Ларионов. – DOI 10.31659/0585-430X-2024-822-3-64-70 // *Строительные материалы*. – 2024. – № 3. – С. 64–70.
31. Дьяков, В.И. Типовые расчеты по электрооборудованию / В.И. Дьяков. – Москва: Высшая школа, 1991. – 160 с.
32. Самсонов, В.М. К проблеме взаимосвязи между углом смачивания и коэффициентом шероховатости поверхности: Смачиваемость кварца расплавом германия / В.М. Самсонов, И.А. Каплунов, А.М. Иванов [и др.]. – DOI 10.7868/S0023291218030084 // *Коллоидный журнал*. – 2018. – Т. 80, № 3. – С. 315–323.
33. Симонян, Г.С. Представление об аномальных и специфических свойствах воды / Г.С. Симонян, Н.М. Аратюнян // *Наука и образование сегодня*. – 2018. – № 4(27). – С. 13–15.
34. Хозин, В.Г. Экологический рейтинг «карбонатных» цементов низкой водопотребности и бетонов на их основе / В.Г. Хозин, О.В. Хохряков, Р.В. Козлов. – DOI 10.52409/20731523\_2021\_2\_60, EDN JPIDNS // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2021. – № 2(56). – С. 60–66.
35. Ibragimov, Ruslan. Study of the Effect of Magnetic Field on Dispersion of Crushed Portland Cement and Tensile Strength of Cement Stone / Ruslan Ibragimov, Evgenij Korolev, Evgeny Khorkov, Linur Gimranov. – DOI: 10.28991/CEJ-2023-09-05-015 // *Civil Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 9, No. 05. – P. 1245–1257

## References

1. Alhawari, O. Insights from Circular Economy Literature: A Review of Extant Definitions and Unravelling Paths to Future Research / O. Alhawari, U. Awan, M. Bhutta, S. Khurram, M.A. Ülkü // *Sustainability*. – 2021. – №13. – 859 p.

2. Velenturf, A.P.M. Principles for a sustainable circular economy / A.P.M. Velenturf, P. Purnell // *Sustain. Prod. Consum.* – 2021. – №27. – P.1437–1457.
3. Romanovich, A.A. Determination of rational parameters for process of grinding materials pre-crushed by pressure in ball mill / A.A. Romanovich, L.G. Romanovich, E.I. Chekhovskoy // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* – 2018. – 327. – 042091.
4. Ciobanu, C. Determination of granulometrical composition of the clinker by grinding in a ball mill to determine the specific consumption of additional energy / C. Ciobanu, P. Tudor, G.-A. Constantin, G. Musuroi // *E3S Web Conf.* – 2020. – 180. – 04007.
5. Duan, J. Grinding behaviors of components in heterogeneous breakage of coals of different ash contents in a ball-and-race mill / J. Duan, Q. Lu, Z. Zhao, X. Wang, Y. Zhang, J. Wang, B. Li, W. Xie, X. Sun, X. Zhu // *Minerals.* – 2020. – 10. – 230.
6. Yang, Y. Effect of moisture on energy-size reduction of lignite coal in Hardgrove mill / Y. Yang, Y. He, X. Bi, J.R. Grace, H. Wang, F. Fotovat, W. Xie, S. Wang // *Fuel.* – 2020. – 270. – 117477.
7. Pareek, P. Review on vertical roller mill in cement industry & its performance parameters / P. Pareek, V.S. Sankhla // *Mater. Today Proc.* 2021. in press.
8. Rittinger, P.R. *Lehrbuch der Aufbereitungskunde in Ihrer Neuesten Entwicklung und Ausbildung* / P.R. Rittinger. – Germany. Berlin: Ernst und Korn, 1867.
9. Kick, F. Contributions to the knowledge of the mechanics of brittle materials / F. Kick // *Dinglers Polytech.* – 1883. – 247. – P.1–5.
10. Bond, F.C. The third theory of comminution / F.C. Bond // *AIME Trans.* – 1952. – 193. – P.484–494.
11. Charles, R.J. High velocity impact in comminution / R.J. Charles // *Min. Eng.* – 1956. – 8. – P.1028–1032.
12. Rebinder, P.A. Surface phenomena in solids in processes of their deformation and destruction / P.A. Rebinder, E.D. Shchukin // *Uspekhi fizicheskikh nauk.* – 1972. – Vol. 108, No. 1. – P. 1.
13. Djingheuzian, L.E. A study of present day grinding / L.E. Djingheuzian // *Can. Min. Metall. Bull.* – 1949. – 42. – P.243–257.
14. Guillot, R. *Le Problème du Broyage et Son Evolution* / R. Guillot; Edit Gauthier. – Switzerland. Villars, 1960.
15. Mielczarek, E. *Free Comminution of Brittle Solid Substances* / E. Mielczarek. – Poland: Czestochowa: Czestochowa University of Technology Press, 1982.
16. Shchukin, E.D. Formation of new surfaces during deformation and destruction of a solid in a surface-active medium / E.D. Shchukin, P.A. Rebinder // *Colloidal magazine.* – 1958. – Vol. 20, No. 5. – P. 645.
17. Urbaniak, D. Research on the Grinding Energy Density in a Jet Mill / D. Urbaniak, H. Otwinowski, T. Wyleciał, V.P. Zhukov, A.Y. Barochkin, J. Boryca. – DOI 10.3390/ma14082008 // *Materials.* – 2021. – 14. – 2008.
18. Malyarov, P. Mineral raw material disintegration mechanisms in ball mills and distribution of grinding energy between sequential stages / P. Malyarov, O. Dolgov, P. Kovalev. – DOI 10.33271/mining14.02.025 // *Mining of Mineral Deposits.* – 2020. – Vol. 14, No. 2. – P. 25–33.
19. Milyukova, I.V. Agglomeration limits of the process of grinding quartz powder on the planetary mill AGO-2 with optimal energy intensity / I.V. Milyukova, S.V. Sobyenin. – DOI 10.17816/byusu20180441-48 // *Bulletin of Yugra State University.* – 2018. – No. 4 (51). – P. 41–48.
20. Zadneprovsky, R.P. Power engineering of grinding materials of different physical states / R.P. Zadneprovsky // *Dry building mixtures.* – 2013. – No. 5. – P. 14–18.
21. Vinokurov, V.R. Calculation of energy efficiency of the centrifugal mill CMWU-800 / V.R. Vinokurov, E.S. Lvov // *Fundamental research.* – 2015. – No. 12–6. – P. 1103–1106.
22. Urbaniak, D. Research on the grinding energy density in a jet mill / D. Urbaniak, H. Otwinowski, T. Wyleciał, V.P. Zhukov, A.Y. Barochkin, J. Boryca. – DOI 10.3390/ma14082008 // *Materials.* – 2021. – 14 (8). – Art. no. 2008.

23. Khozin, V.G. Ecological rating of «carbonate» cements with low water demand and concretes based on them / V.G. Khozin, O.V. Khokhryakov, R.V. Kozlov. – DOI 10.52409/20731523\_2021\_2\_60// News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2021. – No. 2(56). – P. 60–66.
24. Solomatov, V.I. Ways of activating fillers of composite building materials / V.I. Solomatov, L.I. Dvorkin, I.M. Chudnovsky // News of the Higher educational institutions. Construction and architecture. – 1987. – No. 1. – P. 61.
25. Danilov, V.E. Features of calculating the free energy of the surface based on the Owens-Wendt-Rabel model of interphase interaction Kjelble / V.E. Danilov, E.V. Korolev, A.M. Aizenshtadt, V.V. Strokova. – DOI 10.31659/0585-430X-2019-776-11-66-72 // Construction Materials. – 2019. – No. 11. – P. 66.
26. Aizenshtadt, A.M. Physicochemical transformations of saponite-containing material during its activation by grinding / A.M. Aizenshtadt, V.V. Strokova, V.V. Nelyubova [et al.]. – DOI 10.30791/0015-3214-2024-1-53-64 // Physics and chemistry of materials processing. – 2024. – No. 1. – P. 53–64.
27. Ibragimov, R.A. Strength of composites based on modified Portland cement activated in a vortex layer apparatus / R.A. Ibragimov, E.V. Korolev. – DOI 10.33622/0869-7019.2021.01.35-41 // Industrial and civil engineering. – 2021. – No. 1. – P. 35–41.
28. Bikbau, M.Ya. Development of concrete technology using nanocements and dispersed fillers / M.Ya. Bikbau, A.S. Nefedov, E.V. Pankratova // Concrete technologies. – 2023. – No. 4 (189). – P. 55–63.
29. Nosenko, A.A. Methods and devices for measuring the specific surface area of dispersed materials / A.A. Nosenko, S.I. Polovneva. – DOI 10.21285/2227-2925-2017-7-2-113-121 // News of universities. Applied chemistry and biotechnology. – 2017. – Vol. 7, No. 2 (21). – P. 113–121.
30. Ibragimov, R.A. Contact angles of quartz and caustic dolomite powders after mechanomagnetic treatment / R.A. Ibragimov, E.V. Korolev, Yu.V. Bikaeva, I.S. Larionov. – DOI 10.31659/0585-430X-2024-822-3-64-70 // Construction materials. – 2024. – No. 3. – P. 64–70.
31. Dyakov, V.I. Typical calculations for electrical equipment / V.I. Dyakov. – Moscow: Higher. school, 1991. – 160 p.
32. Samsonov, V.M. On the problem of the relationship between the wetting angle and the surface roughness coefficient: Wettability of quartz with germanium melt / V.M. Samsonov, I.A. Kaplunov, A.M. Ivanov [et al.]. – DOI 10.7868/S0023291218030084 // Colloidal journal. – 2018. – Vol. 80, No. 3. – P. 315–323.
33. Simonyan, G.S. The concept of anomalous and specific properties of water / G.S. Simonyan, N.M. Arutyunyan // Science and education today. – 2018. – No. 4(27). – P. 13–15.
34. Khozin, V. G. Environmental rating of «carbonate» cements with low water demand and concretes based on them / V.G. Khozin, O.V. Khokhryakov, R. V. Kozlov. – DOI 10.52409/20731523\_2021\_2\_60, EDN JPIDNS // Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2021. – No. 2(56). – P. 60–66.
35. Ibragimov, Ruslan. Study of the Effect of Magnetic Field on Dispersion of Crushed Portland Cement and Tensile Strength of Cement Stone / Ruslan Ibragimov, Evgenij Korolev, Evgeny Khorkov, Linur Gimranov. – DOI 10.28991/CEJ-2023-09-05-015 // Civil Engineering Journal. – 2023. – Vol. 9, No. 05. – P. 1245–1257

УДК 691.322: 51-74

DOI 10.54734/20722958\_2025\_1\_21

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*  
Россия, 190005, Санкт-Петербург,  
ул. Вторая Красноармейская, д. 4,  
тел.: +7 (812) 316-53-11

**Королев Евгений Валерьевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
проректор по научной работе,  
зав. кафедрой «Технология строительных  
материалов и метрологии»  
E-mail: prorektor\_nr@spbgasu.ru

**Гришина Анна Николаевна,**  
кандидат технических наук, доцент,  
старший научный сотрудник кафедры  
«Технология строительных материалов  
и метрологии»  
E-mail: agrishina@spbgasu.ru

*Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства*  
Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Данилов Александр Максимович,**  
доктор технических наук,  
профессор, советник РААСН,  
главный редактор РИО  
E-mail: fmatem@pguas.ru

*Северный (Арктический) федеральный  
университет им. М.В. Ломоносова*  
Россия, 163002, г. Архангельск,  
набережная Северной Двины, 17,  
тел.: +7 (8182) 41-28-33

**Айзенштадт Аркадий Михайлович,**  
доктор химических наук, профессор,  
директор НОЦ «Наноструктуры  
в строительном материаловедении»,  
профессор кафедры объектов культурного  
наследия Северных и Арктических  
территорий  
E-mail: a.isenshtadt@narfu.ru

*St. Petersburg State University of Architecture  
and Civil Engineering*  
Russia, 190005, St. Petersburg,  
4, Second Krasnoarmeyskaya St.,  
tel: +7 (812) 316-53-11

**Korolev Evgeny Valerievich,**  
Doctor of Sciences, Professor, Vice-Rector for  
Scientific Work, Head of the of the  
Department «Technology of Construction  
Materials and Metrology»  
E-mail: prorektor\_nr@spbgasu.ru

**Grishina Anna Nikolaevna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor,  
Senior Researcher of the Department  
«Technology of Construction Materials  
and Metrology»  
E-mail: agrishina@spbgasu.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*  
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Danilov Aleksander Maksimovich,**  
Doctor of Sciences, Professor, Adviser of the  
Russian Academy of Architectural and  
Construction Sciences, editor-in-chief of the  
editorial and publishing department  
E-mail: fmatem@pguas.ru

*Northern (Arctic) Federal University named  
after M.V. Lomonosov*  
Russia, 163002 Arkhangelsk,  
17, Nab. Severnaya Dvina,  
tel.: +7 (8182) 41-28-33

**Aizenshtadt Arkadij Mikhailovich,**  
Doctor of Chemical Sciences, Professor,  
Director of Scientific Research Center  
«Nanostructures in Building Materials  
Science», Professor of Department of Cultural  
Heritage of Northern and Arctic Territories  
E-mail: a.isenshtadt@narfu.ru

## ОЦЕНКА СТРУКТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ ОТ ОБРАЗОВАНИЯ ПЛЁНОЧНОЙ ФАЗЫ МАТРИЧНОГО МАТЕРИАЛА

Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.М. Данилов, А.М. Айзенштадт

Представлены оценки структурных явлений, возникающих вследствие взаимодействия матричного материала и частиц дисперсной фазы. В результате такого взаимодействия образуется плёночная фаза матричного материала. Дано определение этой фазы композиционного материала. Введено понятие геометрического равновесия композиционного материала, реализация которого позволяет оценить величины двух вариантов структурных эффектов: увеличения пористости материала или его усадки. В результате проведённого количественного анализа можно выделить характеристики дисперсной фазы, которая может проявлять различные функции в материале, а также определить граничное содержание дисперсной фазы, превышение которого приводит к

значительным величинам структурных эффектов. Указано, что локализация формирования плёночной фазы является условием возникновения внутренних напряжений, влияющих на прочность материала.

*Ключевые слова:* матричный материал, плёночная фаза, контактная плёночная фаза, структурные эффекты, усадка, пористость, дисперсная фаза

## EVALUATION OF STRUCTURAL EFFECTS OF FORMATION OF FILM PHASE OF MATRIX MATERIAL

E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.M. Danilov, A.M. Aizenshtadt

The article presents assessments of structural phenomena due to the interaction of matrix material and dispersed phase particles. As a result of this interaction, a film phase of the matrix material is formed. The paper defines this phase of the composite material. The concept of geometric equilibrium of a composite material is introduced, the implementation of which makes it possible to estimate the magnitude of two variants of structural effects: an increase in the porosity of the material or its shrinkage. A quantitative analysis has been carried out to identify the characteristics of the dispersed phase, which can exhibit various functions in the material, as well as to determine the boundary content of the dispersed phase, the excess of which leads to significant structural effects. It is indicated that the localization of the formation of the film phase is a condition leading to internal stresses affecting the strength of the material.

*Keywords:* matrix material, film phase, contact film phase, structural effects, shrinkage, porosity, dispersed phase

**Введение.** Плёночная фаза матричного материала является объектом исследования продолжительный период. В научно-технической литературе она имеет также другие названия, позволяющие достаточно точно её идентифицировать: «контактная зона», «контактный слой» и т.д. [1-9]. Её наличие установлено для материалов как на минеральных вяжущих [1-4], так и на полимерах [5-9]. В обзоре [1] и в [2] представлена информация, составленная на основе результатов различных исследований, о строении и характеристиках зоны контакта цементного камня и заполнителя. Указывается, что контактный слой цементного камня зависит от вида цемента: для портландцемента толщина слоя составляет 2...3 мкм, а для шлакопортландцемента – 0,5...1 мкм. Кроме того, показано, что кристаллы продуктов гидратации цемента (в частности портландит, этtringит) в контактном слое имеют строго ориентированное расположение – перпендикулярно плоскости поверхности заполнителя. Также в [1] представлены данные о влиянии контактного слоя на следующие, более удалённые от зоны контакта области цементного камня. В частности, указывается, что за контактным слоем следует пористый слой, протяжённость которого составляет 5...10 мкм. Этот слой переходит в более плотный переходный слой, протяжённость которого также равна 5...10 мкм. Подробные характеристики указанных слоёв, к сожалению, отсутствуют. Однако даже такая качественная оценка важна для последующего анализа.

Для полимерных материалов также отсутствует подробная информация о строении и характеристиках контактного слоя. Однако в [9] показано, что оптимальная толщина слоя полимера между поверхностями частиц дисперсной фазы (наполнителя) равна 1,4 мкм. Этот слой формируется за счёт частичного перекрытия слоёв полимера, молекулы которого вступили во взаимодействие с поверхностью дисперсной фазы. Отсюда можно заключить, что толщина плёночной фазы полимерного матричного материала составляет не менее 0,7 мкм.

В данной работе будет использоваться только общее название – плёночная фаза матричного материала. Для чёткой идентификации плёночной фазы примем следующее определение. Плёночная фаза матричного материала – это матричный материал, располагающийся в зоне контакта с дисперсной фазой и отличающийся по величине свойств и структуре от матричного материала, расположенного вне зоны контакта с дисперсной фазой. Очевидно, что повышение или снижение величины свойств плёночной фазы зависит от вида дисперсной фазы. Как правило, твёрдые дисперсные материалы способствуют повышению свойств, а жидкие или газообразные –

снижению величин свойств плёночной фазы. В научно-технической литературе, как правило, плёночная фаза обладает повышенными величинами свойств.

Фундаментальное влияние плёночной фазы на структурообразование материалов рассмотрено в работе [10]. В частности, показано, что плёночная фаза матричного материала обеспечивает возникновение нового свойства, характерного только для систем, – эмерджентности (система №2 в [10]). Также она обеспечивает снижение пористости композиционного материала и повышение его прочности.

Отдельные оболочки плёночной фазы, принадлежащие различным частицам дисперсной фазы, могут вступать в контакт и образовывать *контактную плёночную фазу*. Эта новая фаза оказывает интенсифицирующее влияние на структурообразование материала, что приводит к возникновению синергетического эффекта (система №3 в [10]). Такой эффект возможен только при превышении критической концентрации плёночной фазы.

Одновременно с этим плёночная фаза снижает подвижность смеси, что закономерно требует изменения режимов приготовления сырьевой смеси и изготовления изделия [10].

Такое качественное описание не вызывает сомнений. Однако количественные оценки существенно расширяют применимость рассмотренного в [10] системного представления строительных материалов и обеспечат определение параметров их структуры и структурообразования. Построение количественной модели влияния плёночной и контактной плёночной фаз на распределение фаз в материале и объёмные эффекты, возникающие вследствие перераспределения фаз, является целью данной работы.

**Методика построения модели.** Основным уравнением, на основе которого производится построение модели, является уравнение абсолютных объёмов:

$$v_f + v_t + v_{ct} + v_m + v_p = 1,$$

где  $v_i$  – объёмная доля  $i$ -й фазы; индексом « $f$ » обозначена дисперсная фаза, индексами « $t$ » и « $ct$ » – плёночная фаза и контактная плёночная фаза матричного материала, индексом « $m$ » – матричный материал и индексом « $p$ » – пористость материала.

На образование плёночной фазы расходует матричный материал. Это можно записать в виде:

$$v_t = \Delta v_m = S_f h_t / V_0,$$

где  $S_f$  – общая площадь контакта матричного материала с дисперсной фазой;  $h_t$  – толщина плёночной фазы;  $V_0$  – объём материала.

Однако при условии более высокой плотности плёночной фазы  $\bar{\rho}_t$  объём  $\Delta v_m$  будет больше на величину (при соблюдении закона сохранения массы), равную отношению плотностей плёночной фазы и матричного материала  $\rho_m$ . Отсюда с учётом характеристик дисперсной фазы объёмную долю плёночной фазы представим в виде:

$$v_t = v_f \rho_f S_{ud} h_t \frac{\bar{\rho}_t}{\rho_m},$$

где  $\rho_f$  и  $S_{ud}$  – плотность и площадь удельной поверхности частиц дисперсной фазы.

Уменьшение объёма матричного материала, расходующегося на образование плёночной фазы, приводит к возникновению двух вариантов, которые предопределяют формирование материала с минимальным уровнем внутренних напряжений:

1) в результате уменьшения  $v_m$  увеличивается пористость материала за счёт поглощения газовой фазы извне;

2) уменьшение  $v_m$  приводит к уменьшению общего объёма материала (без поглощения газовой фазы извне), а следовательно, к объёмным и линейным деформациям.

Максимальное увеличение пористости  $\Delta v_p$  будет зависеть от величины увеличения плотности плёночной фазы:

$$\Delta v_p = v_f \rho_f S_{ud} h_t \left( \frac{\bar{\rho}_t - \rho_m}{\rho_m} \right).$$



Максимальные объёмные деформации определяются уменьшением объёма материала вследствие образования плёночной фазы. Объём материала в этом случае составит:

$$V = V_0 (1 - \Delta v_p),$$

а объёмные деформации

$$\varepsilon_{V, \max} = \frac{V_0 - V}{V_0} = \Delta v_p$$

Линейные деформации  $\varepsilon_{l, \max}$  связаны с объёмными деформациями известным уравнением:

$$\varepsilon_{l, \max} = \frac{1}{3} \varepsilon_{V, \max} = \frac{1}{3} \Delta v_p.$$

Очевидно, что эти два варианта характеризуют предельные случаи формирования равновесного состояния материала, при котором внутреннее напряженное состояние нивелируется за счёт увеличения пористости (вариант №1) или за счёт усадки. Фактически реализуется некоторый промежуточный вариант (рис. 1). Отклонения, возникающие вследствие как локализации усадки, так и поглощения газовой фазы извне, приводят к появлению внутреннего напряжённого состояния материала, неравномерно распределённого по его объёму. Эта неравномерность распределения напряжений, как следует из причины её возникновения, определяется неравномерностью распределения частиц дисперсной фазы по объёму материала и образованием различных локальных структур из этих частиц.

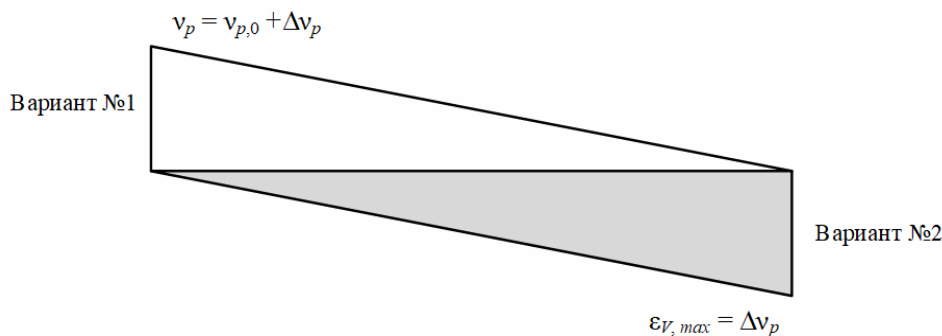


Рис. 1. Предельные случаи влияния образования плёночной фазы матричного материала (здесь  $v_{p,0}$  – начальная пористость материала)

Контактная плёночная фаза матричного материала возникает при контакте оболочек плёночной фазы, принадлежащих различным частицам дисперсной фазы. Очевидно, что такое взаимодействие приводит к уменьшению количества плёночной фазы матричного материала. Это можно записать следующим образом:

$$v_{ct} = \Delta v_t.$$

Однако суммарное содержание этих двух фаз в материале не изменяется; происходит только их взаимное перераспределение.

Возникновение такого контакта оболочек плёночной фазы возможно только при их концентрации выше некоторой критической величины.

**Параметры плёночной фазы.** Общеизвестно, что при взаимодействии лиофильных фаз в зоне их контакта формируется слой вещества, свойства которого по мере удаления от границы контакта постепенно снижаются до величины, характерной этому веществу в нормальном состоянии [9, 11, 12]. Как правило, законы, описывающие такое изменение свойств вещества, являются степенными функциями. В данной работе для описания изменения плотности плёночной фазы будем использовать степенную функцию вида:

$$\rho_t(h) = \frac{B_h}{h^n},$$

где  $B_h$  и  $n$  – константы;  $h$  – толщина слоя.

Для определения констант  $B_h$  и  $n$  необходимо задать граничные условия, которые устанавливаются на основе дополнительной информации контактного взаимодействия исследуемого матричного материала. К таким граничным условиям относятся:

- 1) минимальная  $h_{\min}$  и максимальная  $h_{\max}$  толщины слоя плёночной фазы;
- 2) плотность матричного материала в плёночном состоянии в зоне границы с поверхностью дисперсной фазы  $\rho_t$  и в объёмном состоянии  $\rho_m$ .

Отсюда константы зависимости  $\rho_t(h) = f(h)$  можно вычислить по формулам:

$$n = \frac{\ln(\rho_t / \rho_m)}{\ln(h_{\max} / h_{\min})};$$

$$B_h = \rho_m h_{\max}^n.$$

Типичный вид зависимости  $\rho_t(h) = f(h)$  представлен на рис. 2. Также на этом рисунке отмечена точка, соответствующая средней величине плотности плёночной фазы  $\bar{\rho}_t$ , которая вычисляется по формуле

$$\bar{\rho}_t = \frac{\sum_{i=1}^{N_{cl}} m_{cl,i}}{\sum_{i=1}^{N_{cl}} V_{cl,i}},$$

где  $m_{cl,i}$  и  $V_{cl,i}$  – масса и объём  $i$ -го слоя плёночной фазы;  $N_{cl}$  – количество слоёв.

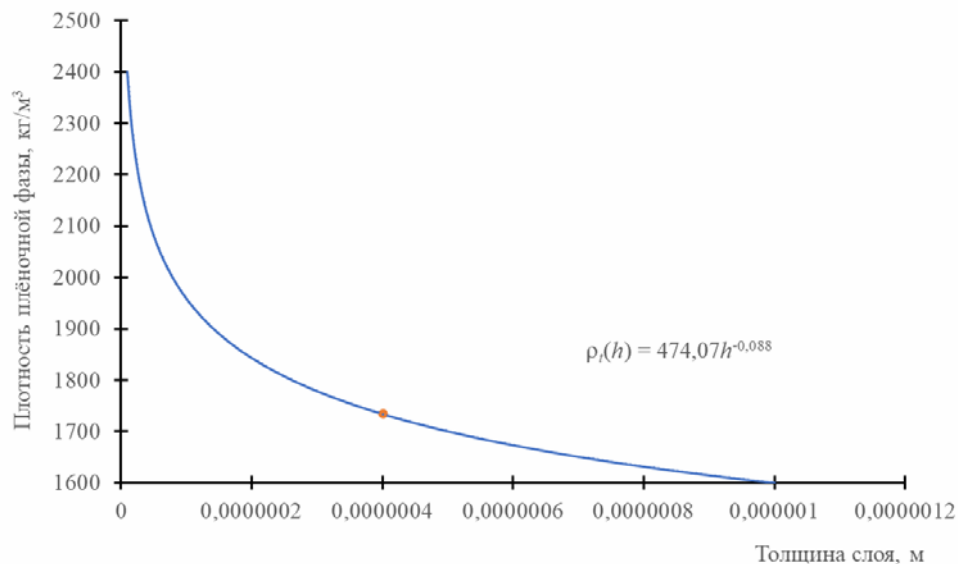


Рис. 2. Типичная зависимость изменения плотности плёночной фазы матричного материала от толщины слоя  
(для расчёта было принято:  $h_{\min} = 10$  нм,  $h_{\max} = 1000$  нм,  $\rho_t = 2400$  и  $\rho_m = 1600$  кг/м<sup>3</sup>; среднее значение плёночной фазы  $\bar{\rho}_t = 1734$  кг/м<sup>3</sup>; на рисунке обозначена точкой красного цвета)

**Параметры контактной плёночной фазы.** Переменными, определяющими объёмную долю контактной плёночной фазы матричного материала  $v_{ct}$ , являются: толщина слоя плёночной фазы у частиц дисперсной фазы  $h_t$ , толщина области пересечения (взаимного проникновения) слоёв плёночной фазы, принадлежащих различным частицам  $h_{ct}$  (рис. 3,а), и количество таких контактов  $N_{ct}$ :

$$v_{ct} = \frac{V_{ct,1} N_{ct}}{V_0},$$

где  $V_{ct,1}$  – объём контактной плёночной фазы, образующийся при одном контакте;  
 $V_0$  – общий объём материала.

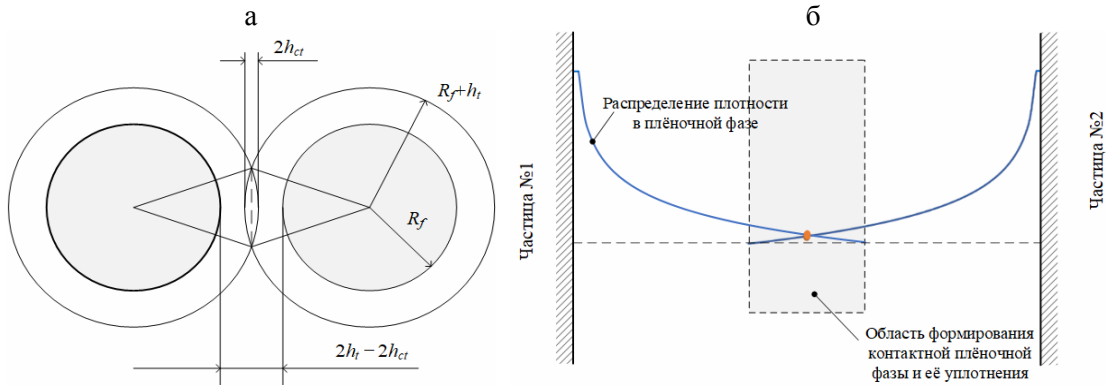


Рис. 3. Геометрическая модель контакта частиц дисперсной фазы, окружённых плёночной фазой матричного материала (а), и изменение плотности матричного материала в области пересечения оболочек плёночных фаз (б)

Величина  $V_{ct,1}$  может быть определена при решении геометрической задачи, представленной на рис. 3, а, из которого видно, что объём контактной плёночной фазы при единичном контакте частиц равен сумме двух шаровых сегментов и, с учётом обозначений, может быть вычислен по формуле

$$V_{ct,1} = 2\pi h_t^2 R_f k_{ct}^2 \left( 1 - \left( \frac{3 - k_{ct}}{3} \right) \frac{h_t}{R_f} \right),$$

где  $R_f$  – радиус частиц дисперсной фазы;  $k_{ct} = h_{ct} / h_t$  – соотношение толщин слоёв плёночной фазы и контактной плёночной фазы матричного материала.

Суммарный объём контактной плёночной фазы в материале равен:

$$V_{ct} = V_{ct,1} N_{ct},$$

где  $N_{ct} = N_f P_{ct}$  – количество контактов;  $N_f$  – количество частиц дисперсной фазы;  $P_{ct}$  – вероятность образования контакта между частицами.

Очевидно, что величина  $P_{ct}$  зависит от объёмной степени наполнения дисперсной фазой  $v_f$ . Естественно, что с увеличением  $v_f$  вероятность контакта возрастает и при  $v_f = 0,74$  она будет равна  $P_{ct} = 1$ . Для построения зависимости  $P_{ct} = f(v_f)$  используем данные, представленные в работе [13]. Установим следующие контрольные точки: 1)  $v_f = 0,085$ ,  $P_{ct} = 0$ ; 2)  $v_f = 0,52$ ,  $P_{ct} = 0,3$ ; 3)  $v_f = 0,74$ ,  $P_{ct} = 1$ . С учётом этих контрольных точек зависимости  $P_{ct} = f(v_f)$  приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Зависимости  $P_{ct} = f(v_f)$

№	Диапазон варьирования $v_f$	Зависимость $P_{ct} = f(v_f)$
1	0,085...0,52	$P_{ct} = 0,691v_f - 0,057$
2	0,52...0,695	$P_{ct} = 1,667v_f - 0,567$
3	0,695...0,74	$P_{ct} = 6,667v_f - 3,933$

После установления количества контактов  $N_{ct}$  объёмная доля контактной плёночной фазы равна:

$$v_{ct} = \frac{3}{2} v_f \left( \frac{h_t}{R_f} \right)^2 (k_p v_f - b_p) k_{ct}^2 \left( 1 - \left( \frac{3 - k_{ct}}{3} \right) \frac{h_t}{R_f} \right) \frac{V_{0,0}}{V_0},$$

где  $V_{0,0}$  – объём материала до образования плёночной фазы;  $k_p$  и  $b_p$  – параметры уравнения  $P_{ct} = f(v_f)$  (см. табл. 1).

Представленное уравнение позволяет провести оценку влияния параметров на величину объёмного содержания контактной плёночной фазы матричного материала.

Важным параметром для определения  $v_{ct}$  является величина  $k_{ct}$  коэффициента, характеризующего долю толщины плёночной фазы  $h_t$ , в которой образуется контактная плёночная фаза вследствие контактного взаимодействия частиц. С учетом характера распределения плотности матричного материала в плёночной фазе (рис. 3, б) очевидно, что в результате взаимного проникновения оболочек плёночных фаз, принадлежащих различным частицам, область пересечения уплотнится.

Из геометрической модели следует, что максимальное значение  $k_{ct}$  для вычисления объёма контактной плёночной фазы равно  $k_{ct, \max} = 0,5$ . Исходя из предположения, что с уплотнением матричного материала в зоне пересечения оболочек возрастают силы сопротивления, можно утверждать, что контрольной точкой, позволяющей обосновать выбор величины  $k_{ct}$ , является абсцисса  $h(\bar{\rho}_t)$  координаты точки средней величины плотности в слое плёночной фазы (см. рис. 2). Отсюда:

– при  $\frac{1}{2} h_{ct} \leq h(\bar{\rho}_t)$  коэффициент  $k_{ct}$  определяется по ранее предложенной формуле  $k_{ct} = h_{ct} / h_t$ ;

– при  $\frac{1}{2} h_{ct} > h(\bar{\rho}_t)$  коэффициент  $k_{ct}$  рассчитывается по формуле  $k_{ct} = h(\bar{\rho}_t) / h_t$  и принимается  $k_{ct} = 0,5$ , если  $h(\bar{\rho}_t) / h_t > 0,5$ .

После определения  $v_{ct}$  объёмная доля плёночной фазы  $v_t$  будет равна:

$$v_t = v_{t,0} - v_{ct},$$

где  $v_{t,0}$  – объёмная доля плёночной фазы матричного материала до образования контактной плёночной фазы.

**Коэффициент степени разделения фаз.** Такой коэффициент введён в работах А.Н. Бобрышева для оценки самопроизвольной аккреции частиц дисперсной фазы в кластеры [9]:

$$\varphi_r = (v_t - v_p) / v_m.$$

Этот коэффициент связан с другой важной характеристикой – параметром порядка, который характеризует относительное упрочнение материала:

$$\Psi = \Delta\sigma / \Delta\sigma_0 = 1 - |\varphi_r|,$$

где  $\Delta\sigma$  – упрочнение материала;  $\Delta\sigma_0$  – максимальное упрочнение материала.

Для оценки влияния на прочность материала всех фаз материала предлагается дополнительный коэффициент разделения фаз  $\varphi_R$ , который учитывает негативное влияние пористости, а также положительное влияние плёночной фазы матричного материала, которая характеризуется большей прочностью по сравнению с её объёмным состоянием. Указанное достигается при минимизации содержания объёмной фазы матричного материала ( $v_m = \min$ ).

Первое слагаемое характеризует положительное влияние дисперсной фазы и негативный вклад пористости:

$$v_f - v_p,$$

а второе – уменьшение  $v_m$  при образовании плёночной и контактной плёночной фаз матричного материала:

$$v_m - v_t - v_{ct}.$$

Отсюда коэффициент разделения фаз  $\varphi_R$  равен:

$$\varphi_R = \frac{v_f - v_p}{v_m - v_t - v_{ct}}.$$

Естественно, оптимальному разделению фаз соответствует  $\varphi_R = \max$ .

**Результаты и обсуждение.** Основными параметрами модели, как и при анализе систем №1–3 в [10], являются объёмная доля дисперсных фаз и площадь удельной поверхности их частиц. Другие же параметры можно принять постоянными величинами; их влияние очевидно. Так, например, увеличение  $h_{\max}$  и соотношения  $\rho_t / \rho_m$  приводит к росту толщины слоя  $h_t$  и средней величины  $\bar{\rho}_t$  плёночной фазы  $v_t$ . Аналогичное увеличивающее влияние на  $v_{ct}$  оказывает коэффициент  $k_{ct}$  и т.д.

Для дальнейшего анализа примем как постоянные следующие соотношения и коэффициенты:

– для плёночной фазы матричного материала:  $\rho_t / \rho_m = 1,25$ ;  $\rho_m = 1600$  кг/м<sup>3</sup>;  
 $h_{\max} / h_{\min} = 100$ ;  $h_{\min} = 10$  нм;

– для контактной плёночной фазы:  $k_{ct} = 0,5$ ;

– для материала:  $v_p(0) = 5\%$ .

Для принятых постоянных параметров модели зависимость плотности плёночной фазы от толщины слоя описывается зависимостью

$$\rho_t(h) = \frac{819,2}{h^{0,048}}.$$

Средняя величина плотности плёночной фазы  $\bar{\rho}_t = 1653,8$  кг/м<sup>3</sup>.

Два варианта расчёта, определяющие условия равновесия в материале вследствие возникновения плёночной фазы матричного материала, определяют качественные структурные изменения. Для варианта расчёта №1 компенсация изменения объёма, возникающего из-за перехода части матричного материала из объёмного состояния в плёночное, происходит за счёт увеличения пористости материала. При этом другие фазы материала остаются постоянными (рис. 4). Для варианта расчёта №2 вследствие указанных преобразований в матричном материале возникает усадка, которая уменьшает общий объём материала, что формально приводит к изменению содержания всех его фаз (рис. 5).

Сопоставление представленных рисунков демонстрирует, что рост пористости по первому варианту расчёта, естественно, кратно выше, чем по второму варианту расчёта. Кроме того, видно, что существенные изменения происходят при высоких степенях наполнения  $v_f$  и при высокой площади удельной поверхности частиц. Это является естественным следствием большего количества плёночной фазы, на образование которой расходуется матричный материал, находящийся в объёмном состоянии (рис. 6 и 7).

Из данных, представленных на рис. 6, 7, следует, что при высоких содержаниях дисперсной фазы ( $v_f \geq 0,4$ ) зависимость содержания плёночной фазы от дисперсности её частиц становится экстремальной, а объёмная доля матричного материала в объёмном состоянии  $v_m = 0$ , то есть весь матричный материал переходит в плёночное состояние. Причём абсциссы экстремумов совпадают как для первого, так и для второго варианта расчёта.

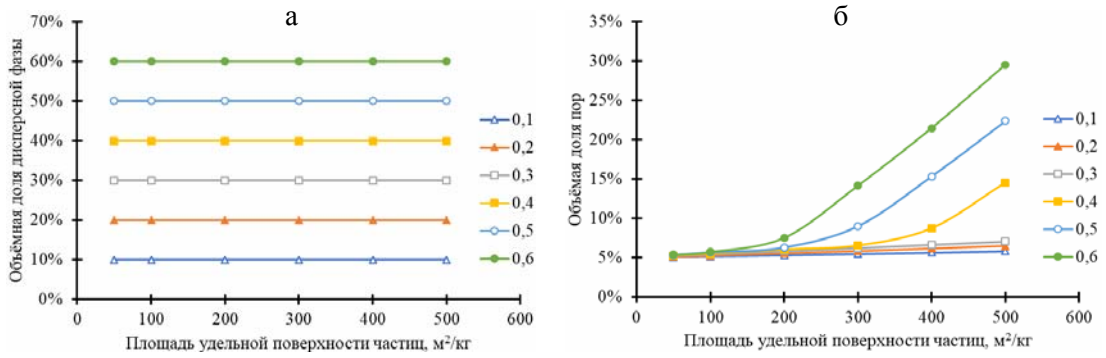


Рис. 4. Изменение объёмных долей дисперсной фазы (а) и пор (б) от начального содержания дисперсной фазы и площади удельной поверхности её частиц (вариант №1)

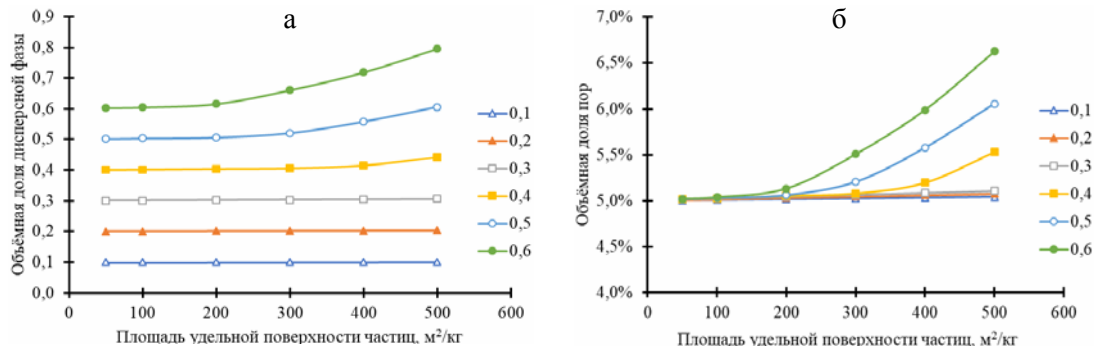


Рис. 5. Изменение объёмных долей дисперсной фазы (а) и пор (б) от начального содержания дисперсной фазы и площади удельной поверхности её частиц (вариант №2)

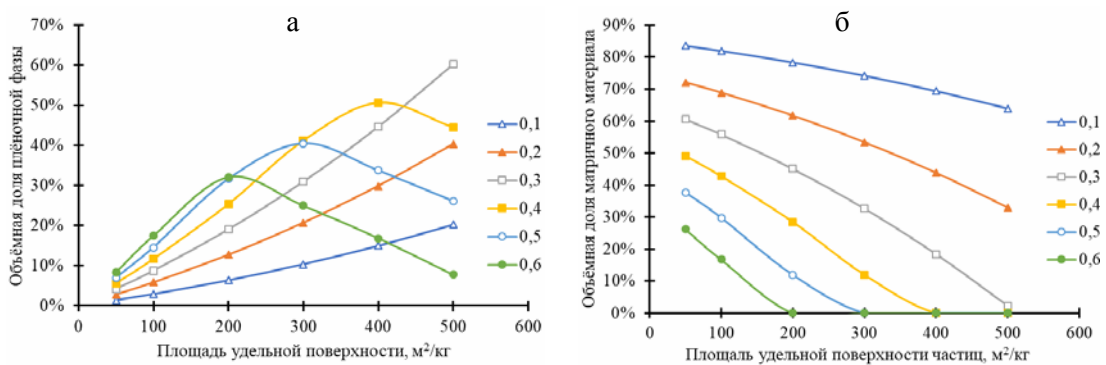


Рис. 6. Изменение объёмных долей плёночной фазы (а) и объёмной фазы матричного материала (б) от начального содержания дисперсной фазы и площади удельной поверхности её частиц (вариант №1)

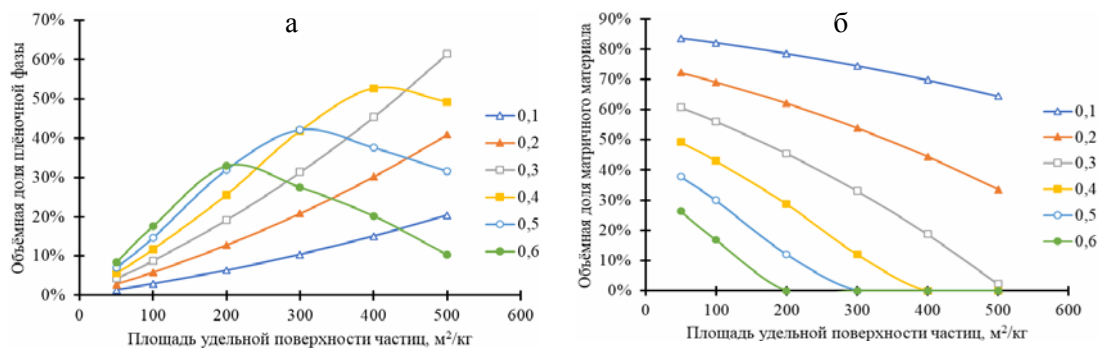


Рис. 7. Изменение объёмных долей плёночной фазы (а) и объёмной фазы матричного материала (б) от начального содержания дисперсной фазы и площади удельной поверхности её частиц (вариант №2)

Экстремум на зависимости содержания плёночной фазы  $v_f$  от дисперсности частиц указывает на недостаточное количество матричного материала в объёмном состоянии для формирования оболочки вокруг частиц плёнки с заданными толщиной и плотностью плёночной фазы. Это, вследствие отсутствия термодинамического равновесия (неполной компенсации поверхностной энергии дисперсной фазы), приводит к формированию кластерных структур, состоящих из близкорасположенных частиц дисперсной фазы [9, 14, 15].

Указанные термодинамические условия являются необходимым обоснованием для формирования контактной плёночной фазы матричного материала (рис. 8). Данные, приведенные на рис. 8, демонстрируют, что максимальное содержание  $v_{ct}$  не превышает 2,5...3,5 %. При этом из предположения, представленного в работе [10], следует, что указанная фаза является необходимой для синергетического эффекта, возникающего при введении дисперсной фазы (наполнения материала).

Такие малые количества контактной плёночной фазы матричного материала (существенно меньше критической концентрации перехода «диэлектрик – проводник» ( $\approx 7,5$  %) или первого порога протекания ( $\approx 16$  %) [9, 16]) и экспериментально установленный синергетический эффект при наполнении различных материалов указывают, что ключевое влияние на возникновение этого эффекта должны оказывать форма частиц дисперсной фазы (частицы несферической формы) и поверхностные явления в зоне контакта частиц дисперсной фазы и матричного материала, а именно шероховатость поверхности частиц (эффект Венцеля – Дерягина) и энергетическая насыщенность пиков шероховатости.

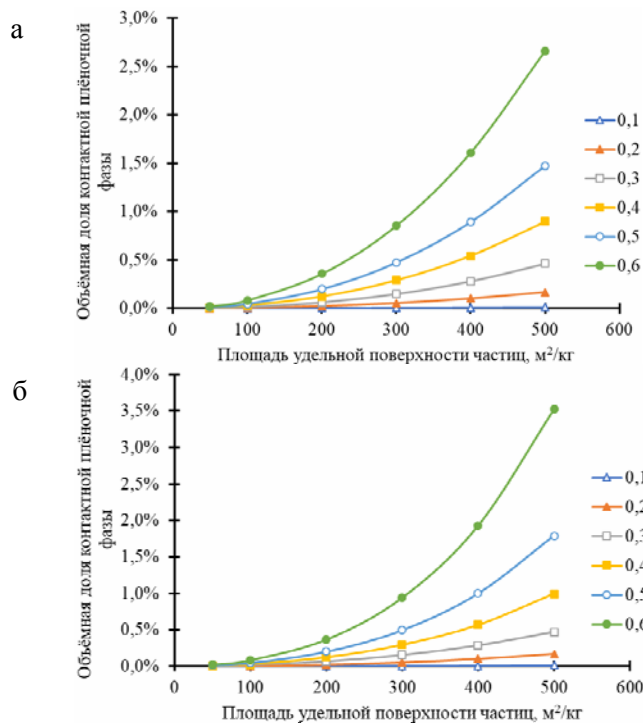


Рис. 8. Зависимость объёмной доли контактной плёночной фазы от содержания и площади удельной поверхности частиц дисперсной фазы:

а – при первом варианте расчёта; б – при втором варианте расчёта

Оценка условий формирования структурного элемента, представляющего собой частицы дисперсной фазы, окружённые плёночной фазой матричного материала и соединённые контактной плёночной фазой (рис. 9), показывает, что перколяционный каркас (создаётся при объёмной концентрации узлов  $v > 0,16$  [9]) такого структурного элемента образуется при  $v_f \geq 0,4$  и площади удельной поверхности частиц  $S_{ud} > 100$  м<sup>2</sup>/кг (рис. 10).

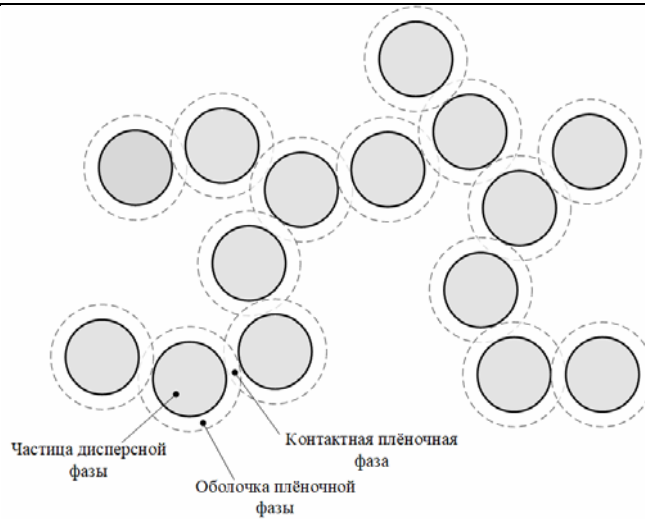


Рис. 9. Структурный элемент, формируемый при образовании контактной плёночной фазы матричного материала

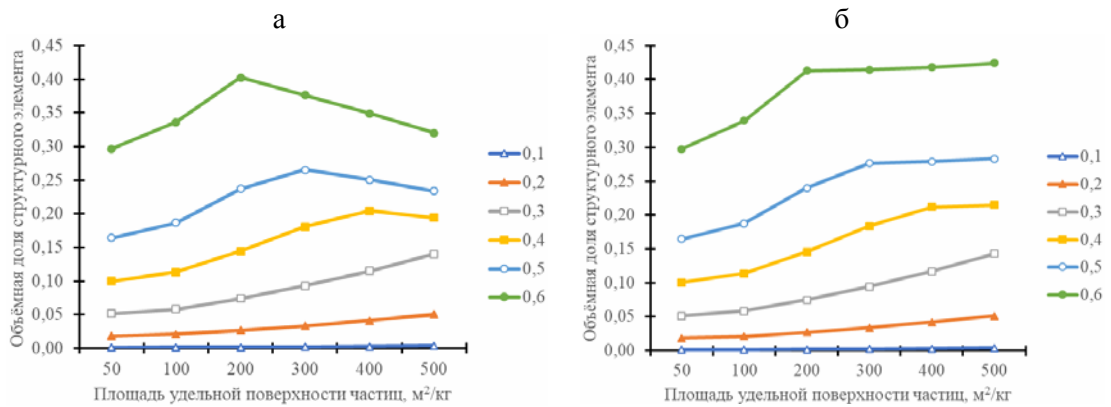


Рис. 10. Зависимость объёмной доли структурного элемента, представленного на рис. 9, от содержания и площади удельной поверхности частиц дисперсной фазы: а – при первом варианте расчёта; б – при втором варианте расчёта

Как ранее было отмечено, сложный характер распределения фаз в материале вследствие образования плёночной фазы оказывает влияние на прочность материала. Характеристиками, позволяющими оценить это влияние, являются коэффициент разделения фаз А.Н. Бобрышева [9] и коэффициент разделения фаз  $\varphi_R$  (рис. 11).

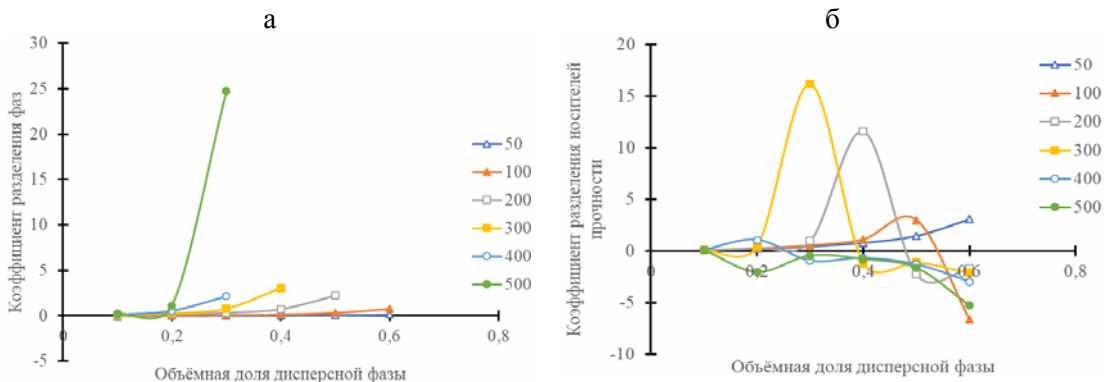


Рис. 11. Коэффициенты разделения фаз: а – коэффициент разделения фаз по А.Н. Бобрышеву [9]; б – коэффициент разделения фаз  $\varphi_R$

Данные, представленные на рис. 11, демонстрируют значительное отличие от указанных коэффициентов. Так, если коэффициент разделения фаз А.Н. Бобрышева



имеет восходящий характер изменения, то коэффициент  $\varphi_R$  имеет отличия как по знаку величины, так и по виду зависимости: восходящий или экстремальный. На особенности изменения коэффициента  $\varphi_R$  влияние оказывает площадь удельной поверхности (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Характеристики коэффициента  $\varphi_R$  (рис. 11)

Площадь удельной поверхности частиц, м <sup>2</sup> /кг	Величина $\varphi_R$	Вид зависимости $\varphi_R = f(S_{ud})$
50	$\varphi_R > 0$	Восходящий
100...400	$\varphi_R > 0$ и $\varphi_R < 0$	Экстремальный
500	$\varphi_R < 0$	Экстремальный

Такое изменение  $\varphi_R = f(S_{ud})$  вполне соответствует функции, которую выполняет дисперсная фаза в материале. Частицы с  $S_{ud} = 50$  м<sup>2</sup>/кг будут выполнять функцию мелкого заполнителя: объёмные доли плёночной фазы  $v_t$  и контактной плёночной фазы  $v_{ct}$  матричного материала, оказывающие влияние на прочность материала, минимальны. Частицы с  $S_{ud} = 100...400$  м<sup>2</sup>/кг выполняют функции наполнителя, который оказывает значительное влияние на распределение фаз в материале и его свойства. При этом их влияние заключается не только в формировании плёночной и контактной плёночной фаз матричного материала, но и во внесении вклада, определяемого собственными свойствами вещества наполнителя. Интенсивность влияния наполнителя на разделение фаз  $\varphi_R$  зависит от его характеристик. Из данных рис. 11 следует, что наибольшие значения коэффициент  $\varphi_R$  демонстрирует для частиц дисперсной фазы с  $S_{ud} = 200$  и  $S_{ud} = 300$  м<sup>2</sup>/кг. Влияние частиц с  $S_{ud} = 500$  м<sup>2</sup>/кг можно определить как исключительное влияние поверхности дисперсной фазы. Такие частицы целесообразно определить как минеральные модификаторы, интенсивность влияния которых зависит от общей площади поверхности частиц.

**Вывод.** Таким образом, изменения распределения фаз в материале, как указано ранее, оцениваются ростом пористости (вариант расчёта №1) или возникновением усадки (вариант расчёта №2). Количественная оценка этих эффектов представлена на рис. 12, из которой следует, что формирование плёночной фазы матричного материала может приводить к кратному увеличению пористости материала или к возникновению значительных внутренних напряжений, которые на этапе формирования структуры материала будут оказывать существенное влияние на параметры структуры матричного материала.

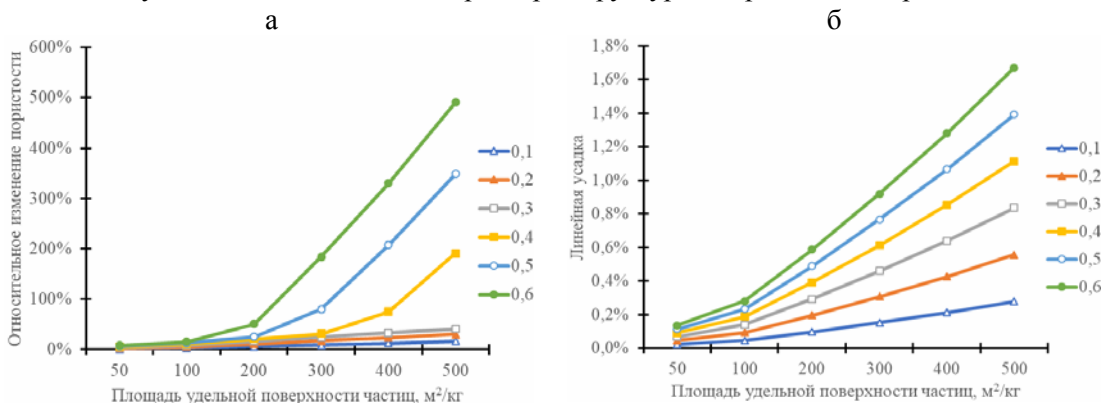


Рис. 12. Эффекты, возникающие при образовании плёночной фазы матричного материала:  
 а – при первом варианте расчёта (увеличение пористости материала);  
 б – при втором варианте расчёта (возникновение усадки)

Необходимо отметить, что полученные результаты оценки структурных эффектов не только совпадают с данными, представленными в [1, 4], на качественном уровне, но и позволяют провести количественную оценку последствий формирования плёночной фазы матричного материала.

### Список литературы

1. Каримов, И.Ш. Прочность сцепления цементного камня с заполнителями в бетоне и факторы, влияющие на нее / И.Ш. Каримов // Технологии бетонов. – 2013. – №4. – С. 28–31.
2. Любимова, Т.Ю. Особенности кристаллизационного твердения минеральных вяжущих веществ в зоне контакта с различными твердыми фазами (заполнителями) / Т.Ю. Любимова // Сборник статей, подготовленных редакцией Коллоидного журнала «Физико-химическая механика дисперсных структур». – Москва: Наука, 1966. – С.268–279.
3. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – Москва: АСВ, 2011. – 528 с.
4. Вербецкий, Г.П. Прочность и долговечность бетона в водной среде / Г.П. Вербецкий. – Москва: Стройиздат, 1976. – 128 с.
5. Калмыков, Ю. Б. Влияние размера и концентрации наполнителей на физико-механические свойства композитного полимерного материала / Ю.Б. Калмыков, Н.В. Дракин, О.Л. Дубрава // Механика композитных материалов. – 1989. – № 2. – С. 204–213.
6. Липатов, Ю.С. Физикохимия наполненных полимеров / Ю.С. Липатов. – Киев: Наукова думка, 1967. – 233 с.
7. Липатов, Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров / Ю.С. Липатов. – Москва: Химия, 1991. – 260 с.
8. Плюдеман, Э. Поверхность раздела в полимерных композитах: в 8 томах / Э. Плюдеман. – Москва: Мир, 1978. – Т. 6. – 294 с.
9. Бобрышев, А.Н. Физика и синергетика дисперсно-неупорядоченных конденсированных композитных систем / А.Н. Бобрышев, В.Т. Ерофеев, В.Н. Козомазов. – Санкт-Петербург: Наука, 2012. – 476 с.
10. Королев, Е.В. Системный анализ эволюции знаний о структурообразовании строительных материалов / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.М. Данилов, А.М. Айзенштадт // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – № 9. – С. 18–27.
11. Русанов, А.И. Развитие фундаментальных положений термодинамики поверхностей / А.И. Русанов // Коллоидный журнал. – 2012. – Т. 74, № 2. – С. 148–166.
12. Русанов, А.И. Лекции по термодинамике поверхностей / А.И. Русанов. – Санкт-Петербург: Лань, 2013. – 240 с.
13. Бобрышев, А.Н. Анализ распределения наполнителя в структуре композитов / А.Н. Бобрышев, П.А. Зубарев, П.И. Кувшинов, А.В. Лахно // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. – 2012. – Вып. 1 (20). – URL: [www.vestnik.vgasu.ru](http://www.vestnik.vgasu.ru). – Microsoft Word – BobryshevZubarevKuvshinovLakhno-2012\_\_1\_20.doc (доступ свободный).
14. Королев, Е.В. Радиационно-защитные и химически стойкие серные строительные материалы / Е.В. Королев, Ю.М. Баженов, А.И. Альбакасов. – Оренбург, 2010. – 364 с.
15. Прошин, А.П. Динамические модели при исследовании кластерообразования в композиционных материалах. Предельные системы / А.П. Прошин, А.М. Данилов, Е.В. Королев, В.А. Смирнов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2003. – № 3 (531). – С. 32–38.
16. Эфрос, А.Л. Физика и геометрия беспорядка / А.Л. Эфрос. – Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 176 с.

## Reference

1. Karimov, I.S. The adhesion strength of cement stone with fillers in concrete and the factors influencing it / I.S. Karimov // *Technologies of concretes*. – 2013. – No.4. – P. 28–31.
2. Lyubimova, T.Y. Features of crystallization hardening of mineral binders in the contact zone with various solid phases (fillers) / T.Y. Lyubimova // *Collection of articles prepared by the editorial board of the Colloidal journal «Physico-chemical mechanics of dispersed structures»*. – Moscow: Science, 1966. – P. 268–279.
3. Bazhenov, Yu.M. *Technology of concrete* / Yu.M. Bazhenov. – Moscow: ASV, 2011. – 528 p.
4. Verbetsky, G.P. *Strength and durability of concrete in an aqueous environment* / G.P. Verbetsky. – Moscow: Stroyizdat, 1976. – 128 p.
5. Kalmykov, Yu.B. The influence of the size and concentration of fillers on the physico-mechanical properties of a composite polymer material / Yu.B. Kalmykov, N.V. Drakin, O. L. Dubrava // *Mechanics of composite materials*. – 1989. – No. 2. – P. 204–213.
6. Lipatov, Yu.S. *Physicochemistry of filled polymers* / Yu.S. Lipatov. – Kiev: Naukova dumka, 1967. – 233 p.
7. Lipatov, Yu.S. *Physico-chemical bases of polymer filling* / Yu.S. Lipatov. – Moscow: Chemistry, 1991. – 260 p.
8. Pludeman, E. *The interface in polymer composites: in 8 volume* / E. Pludeman. – Moscow: Mir, 1978. – Vol. 6. – 294 p.
9. Bobryshev, A.N. *Physics and synergetics of dispersed disordered condensed composite systems* / A.N. Bobryshev, V.T. Yerofeev, V.N. Kozomazov. – Saint-Petersburg: Nauka, 2012. – 476 p.
10. Korolev, E.V. *System analysis of the evolution of knowledge about the structure of building materials* / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.M. Dannilov, A.M. Aisenstadt // *Industrial and civil construction*. – 2024. – No. 9. – P. 18–27.
11. Rusanov, A.I. *Development of fundamental principles of thermodynamics of surfaces* / A.I. Rusanov // *Colloidal Journal*. – 2012. – Vol. 74, No. 2. – P. 148–166.
12. Rusanov, A.I. *Lectures on thermodynamics of surfaces* / A.I. Rusanov. – Saint-Petersburg: Lan, 2013. – 240 p.
13. Bobryshev, A.N. *Analysis of filler distribution in the structure of composites* / A.N. Bobryshev, P.A. Zubarev, P.I. Kuvshinov, A.V. Lakhno // *VolgGASU Internet Bulletin. Ser.: Polythematic*. – 2012. – Issue 1 (20). – URL: [www.vestnik.vgasu.ru](http://www.vestnik.vgasu.ru). – Microsoft Word – BobryshevZubarevKuvshinovLakhno-2012\_\_1\_20.doc (access is free).
14. Korolev, E.V. *Radiation-protective and chemically resistant sulfur building materials* / E.V. Korolev, Y.M. Bazhenov, A.I. Albasov. – Orenburg, 2010. – 364 p.
15. Proshin, A.P. *Dynamic models in the study of cluster formation in composite materials. Limit systems* / A.P. Proshin, A.M. Danilov, E.V. Korolev, V.A. Smirnov // *News of Higher educational institutions. Construction*. – 2003. – No. 3 (531). – P. 32–38.
16. Efros, A.L. *Physics and geometry of disorder* / A.L. Efros. – Moscow: Nauka. The main edition of the physical and mathematical literature, 1982. – 176 p.

УДК 691:519.7: 001.8

DOI 10.54734/20722958\_2025\_1\_35

*Московский политехнический университет*  
Россия, 107023, г. Москва,  
ул. Б.Семёновская, д. 38

**Будылина Евгения Александровна**,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры «Инфокогнитивные  
технологии»  
E-mail: bud-ea@yandex.ru

*Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства*

Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Гарькина Ирина Александровна**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Математика  
и математическое моделирование»  
E-mail: fmatem@pguas.ru

**Данилов Александр Максимович**,  
доктор технических наук,  
профессор, советник РААСН,  
главный редактор РИО  
E-mail: fmatem@pguas.ru

*Moscow Polytechnic University*

Russia, 107023, Moscow,  
38, B.Semenovskaya St.

**Budylna Eugenia Aleksandrovna**,  
Candidate of Physical and Mathematical  
Sciences, Associate Professor of the  
Department «Infocognitive technologies»  
E-mail: bud-ea@yandex.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Garkina Irina Aleksandrovna**,  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the Department «Mathematics and  
Mathematical Modeling»  
E-mail: fmatem@pguas.ru

**Danilov Aleksander Maksimovich**,  
Doctor of Sciences, Professor, Adviser of the  
Russian Academy of Architectural and  
Construction Sciences, editor-in-chief of the  
editorial and publishing department  
E-mail: fmatem@pguas.ru

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К СИНТЕЗУ СЛОЖНЫХ СЛАБОФОРМАЛИЗУЕМЫХ СИСТЕМ

Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов

Определяется логико-математическая область исследований, задачей которой является формулировка общих принципов исследования систем для разработки композиционных материалов: при традиционном подходе композит рассматривается как неструктурированная среда, а при системном – как структурированная (в строительном материаловедении – смена парадигмы). Анализируются новые методологические подходы (альтернативны по отношению и к традиционному математическому подходу) к организации и накоплению знаний, к их переносу на новые объекты, процессы и явления. Показывается, задача оптимизации всегда должна формулироваться для системы в целом, а не для отдельных подсистем; решающими факторами эффективности системы являются определение гипотез, описание динамических процессов, а также трудности неформального характера; для многоцелевой системы характерна сложность её иерархической структуры критериев качества. Приводится пример использования условий Куна – Таккера при синтезе композиционных материалов со специальными свойствами.

*Ключевые слова: композиционные материалы, сложные системы, логико-математические модели, управление, идентификация, синтез*

## METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE SYNTHESIS OF COMPLEX WEAKLY FORMALIZABLE SYSTEMS

E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov

A logical and mathematical area of the research is defined. The task of it is to formulate general principles of systems research for the development of composite materials: with traditional approach the composite is considered as an unstructured environment and with a system approach – as a structured one (in construction materials science – a paradigm shift). New methodological approaches (alternative to the traditional mathematical approach) to the organization and accumulation of

knowledge, to its transfer to new objects, processes and phenomena are analyzed. It is shown that the optimization problem should always be formulated for the system as a whole, and not for individual subsystems; the decisive factors in the effectiveness of the system are the definition of hypotheses, description of dynamic processes, as well as informal difficulties; for a multi-purpose system – the complexity of the hierarchical structure of quality criteria. An example of using the Kuhn – Tucker conditions in the synthesis of composite materials with special properties is given.

*Keywords: composite materials, complex systems, logical-mathematical models, control, identification, synthesis*

Качественные модели сложных и очень сложных систем довольно эффективно строятся на основе математического аппарата графов, позволяющих формализовать взаимодействие обратных связей, существующих между процессами, определяющими функционирование и развитие системы. При построении таких моделей может быть использована неполная, нечеткая или даже противоречивая информация. Когнитивное (графовое) моделирование сложных процессов позволяет дать качественные оценки процессов (принципиально новые элементы в структуре систем поддержки принятия решений). Наиболее перспективной в развитии и внедрении средств когнитивного анализа и моделирования является их интеграция с традиционными средствами анализа и моделирования. Когнитивный подход к качественному, а не количественному анализу и управлению процессами применяется для решения технических задач и в случае, когда построение точных числовых моделей исследуемых явлений затруднительно. Здесь нами делается акцент на новые методологические подходы к организации и накоплению знаний, к их переносу на новые объекты, процессы и явления. Эти подходы в значительной мере альтернативны по отношению и к традиционному математическому подходу, как по способам выражения знаний, так и по способам их применений, больше опираются на творчество и интуицию. Они могут служить эффективным дополнением математическому подходу там, где возможности его использования ограничены или же подходящие математические средства еще не созданы.

Многочисленные успехи классической науки пока не привели к пересмотру ее фундаментальной парадигмы — однолинейной причинности и расчленения предмета исследования на элементарные составляющие. Бурно развивающаяся общая теория систем фактически представляет собой логико-математическую область исследований, задачей которой является формулировка общих принципов исследования систем. Осуществляемая в рамках этой теории точная формулировка таких понятий, как целостность и сумма, дифференциация, прогрессивная механизация, централизация, иерархическое строение и т.п., должна позволить эти понятия применять во всех дисциплинах, имеющих дело с системами. Тогда системные законы представляются в виде аналогий: законов, представляющихся идентичными формально, но относящихся к описанию различных явлений в рамках разных дисциплин. Методологическое значение теории систем заключается в том, что общая теория систем, являясь моделью определенных общих аспектов реальности, позволяет увидеть многое из того, что раньше не замечалось или эти вопросы обходились [1–5]. В основе проектирования систем лежит общая формулировка технического задания на проектирование; происходит последовательно усложнение решаемых задач и, как следствие, увеличение сложности и стоимости проектирования; возрастают трудоемкость изготовления и время полного цикла создания. Проектируемая система является компонентом системы более высокого порядка (надсистемы). О проекте системы можно говорить как о большой сложной модели, отражающей все свойства будущей реальной системы; он представляет собой ряд зависимостей между целями проектирования, возможными целями их достижения, окружающей средой и ресурсами. Выбор некоторого проектного решения из возможных альтернативных вариантов (средство достижения целей проектирования) осуществляется на основе некоторого показателя (критерия выбора), обобщенно характеризующего степень достижения поставленной цели тем или иным вариантом проекта. На этой стадии проектирования система рассматривается как совокупность взаимосвязанных, управляемых подсистем, объединенных общей целью функционирования для решения заданной проблемы в некотором

диапазоне условий. При этом важнейшими свойствами многоцелевых систем (в том числе материалов) являются управляемость, наблюдаемость и идентифицируемость.

Объект вполне управляем, если для любых его состояний  $\mathbf{X}^0 = (x_1(t_0), x_2(t_0), \dots, x_n(t_0))^T$  и  $\mathbf{X}^T = (x_1(T), x_2(T), \dots, x_n(T))^T$ , значений аргумента  $t_0$  и  $T$  существует управление  $\mathbf{Y}(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t))^T$ , переводящее объект из состояния  $\mathbf{X}^0$  в состояние  $\mathbf{X}^T$ .

Объект полностью наблюдаем (частично наблюдаем), если определены все компоненты вектора  $\mathbf{X}(t)$  (определены не все компоненты вектора наблюдения). Задача определения вектора  $\mathbf{X}(t_0)$  (или отдельных компонентов вектора) по вектору выхода  $\mathbf{Z}(t)$ , определяемому на промежутке  $[t_0 - \theta, t_0]$ , где  $\theta$  – фиксированное положительное число, является задачей наблюдаемости, а матрицы  $\mathbf{A}(t), \mathbf{B}(t)$  – наблюдаемыми, если задача наблюдаемости разрешима по известному вектору выхода  $\mathbf{Z}(t)$ . При переводе объекта из некоторого начального в конечное состояние в простейшем случае левый конец закреплен, правый – свободен (если указан момент  $T$  перехода системы в конечное состояние, то получим задачу с фиксированным временем). Ярким примером является и материаловедческая задача управления кинетическими процессами (например, набора прочности): налицо аналогия между допустимыми управлениями и критериями качества в теории управления и материаловедении. Для систем с неизвестным конечным состоянием невозможно построить систему программного управления; возникает потребность в обратной связи.

При компенсации случайных возмущений вектор-функция

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{Y}^*(t) + \Delta\mathbf{Y}(t),$$

где  $\mathbf{Y}^*(t)$  – программное управление, соответствующее оптимальной программе  $\mathbf{X}^*(t)$ ; корректирующее управление  $\Delta\mathbf{Y} = \Delta\mathbf{Y}(t, \Delta\mathbf{X})$  зависит от возмущения  $\mathbf{n}(t)$ .

Получили схему двухэтапной оптимизации, разделяющую процесс управления на два последовательных этапа: построение программы и синтез механизма реализации этой программы. Применимость такой схемы в задачах материаловедения подтверждается управлением различными техническими и технологическими процессами. Не останавливаясь подробно на проблемах скаляризации и системном подходе к проектированию сложных систем, отметим, что задачу их оптимизации даже в упрощенном виде следует формулировать для системы в целом, а не для отдельных подсистем. Синтез композиционных материалов как многоцелевых систем с позиций теории управления нами подробно рассматривался в [6–9].

В материаловедении наибольшее распространение для описания функции отклика и прогнозирования свойств материалов получили:

– регрессионные модели  $y = \eta + \varepsilon = f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) + \varepsilon$  (зависимость отклика от количественных факторов  $\mathbf{x}$  и ошибок  $\varepsilon$  наблюдения отклика);

– модели дисперсионного анализа (изучается зависимость отклика от качественных факторов и ошибок наблюдений отклика:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \cdots + \beta_k x_k + \varepsilon,$$

где  $x_i$  – дискретные переменные, обычно целочисленные);

– методы ковариационного анализа (сочетание элементов регрессионного и дисперсионного анализа; учитываются воздействия на отклик как количественных, так и качественных факторов).

На практике чаще всего используются полиномиальные модели:

– модель регрессионного анализа первого порядка:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \cdots + \beta_k x_k + \varepsilon;$$

– квадратичная модель:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + \beta_{12} x_1 x_2 + \dots + \beta_{k-1,k} x_{k-1} x_k + \beta_{11} x_1^2 + \dots + \beta_{k,k} x_k^2 + \varepsilon.$$

Адекватность модели проверяется по известному  $F$ -критерию Фишера.

Возможности практического использования полученных моделей существенно определяются:

- априорным ранжированием факторов;
- выбором размахов (разности между максимальным и минимальным натуральными значениями факторов), определяющих границы области варьирования факторов;
- выбором интервалов варьирования факторов в факторном пространстве (половина размаха варьирования фактора  $\Delta x_i^H$ ; задает область  $(x_{i0}^H + \Delta x_i^H; x_{i0}^H - \Delta x_i^H)$  действия для данного плана);
- удачным выбором функции отклика (зависимость математического ожидания отклика от факторов  $E[y/\mathbf{x}] = \eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)$ ; параметры модели  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$  априори неизвестны и подлежат определению из эксперимента).

В полиномиальном уравнении регрессии эффекты взаимодействия факторов (зависимости изменения эффекта одного фактора от уровней других факторов) определяются параметрами при членах, включающих произведения факторов (парные взаимодействия –  $x_i x_j$ , тройные –  $x_i x_j x_k$  и т.д.)

Если из соображений, связанных с существом изучаемого явления или просто с внешним видом наблюдаемой зависимости, выбран общий вид функции  $\varphi(x_i, a_0, a_1, \dots, a_m)$ , зависящий от нескольких числовых параметров  $a_0, a_1, \dots, a_m$ , и требуется выбрать  $a_k$  ( $k = \overline{1, m}$ ) так, чтобы выполнялось условие

$$\sum_{i=1}^n [y_i - \varphi(x_i, a_0, a_1, \dots, a_m)]^2 = \min,$$

то значения  $a_k$  определяются из условий:

$$\sum_{i=1}^n [y_i - \varphi(x_i, a_0, a_1, \dots, a_m)] \left( \frac{\partial \varphi}{\partial a_k} \right)_{x=x_k} = 0.$$

При сглаживании полиномом

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_m x^m$$

коэффициенты  $a_0, a_1, \dots, a_m$  определяются из системы уравнений:

$$\begin{aligned} a_0 n + a_1 \sum_i x_i + a_2 \sum_i x_i^2 + \dots + a_m \sum_i x_i^m &= \sum_i y_i; \\ a_0 \sum_i x_i + a_1 \sum_i x_i^2 + a_2 \sum_i x_i^3 + \dots + a_m \sum_i x_i^{m+1} &= \sum_i x_i y_i; \\ &\dots \\ a_0 \sum_i x_i^m + a_1 \sum_i x_i^{m+1} + a_2 \sum_i x_i^{m+2} + \dots + a_m \sum_i x_i^{2m} &= \sum_i x_i^m y_i. \end{aligned}$$

Если минимизируется сумма линейной и квадратичной форм при ограничениях вида линейных неравенств при неотрицательности переменных:

$$q(\mathbf{x}) = \sum_j c_j x_j + \sum_j \sum_k d_{jk} x_j x_k = \min; \sum_k a_{ik} x_k - b_i \leq 0, i = \overline{1, m}; x_i \geq 0, j = \overline{1, n}; \quad (1)$$

квадратичная форма – положительно определённая (а значит, и выпуклая;  $f(\mathbf{x})$  является выпуклой, если при любом  $0 \leq \lambda \leq 1$  справедливо

$$f[\lambda \mathbf{x}_1 + (1-\lambda) \mathbf{x}_2] \leq \lambda f(\mathbf{x}_1) + (1-\lambda) f(\mathbf{x}_2).$$

Линейная форма – также выпуклая функция. Поэтому целевая функция будет выпуклой. Необходимые условия Куна – Таккера являются и достаточными условиями существования единственного оптимума. Для записи условий Куна – Таккера введём в рассмотрение функцию Лагранжа:

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = \sum_j c_j x_j + \sum_j \sum_k d_{jk} x_j x_k + \sum_i \lambda_i \left( \sum_k a_{ik} x_k - b_i \right);$$

производные от  $L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda})$  по  $x_j$  и  $\lambda_i$  запишутся в виде:

$$c_j + 2 \sum_k d_{jk} x_k + \sum_i \lambda_i a_{ij} = p_j, j = \overline{1, n}; \quad b_i - \sum_k a_{ik} x_k = q_i, i = \overline{1, m}. \quad (2)$$

Требуется найти решение при условиях:

$$x_j p_j = 0, \lambda_i q_i = 0, x_j \geq 0; \quad \lambda_i \geq 0, p_j \geq 0, q_i \geq 0; \quad i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n} \quad (3)$$

(в классической задаче оптимизации определяется минимум целевой функции  $q(\mathbf{x})$ ;  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – точка в пространстве  $R^n$  при наличии ограничений типа равенств  $f_i(\mathbf{x}) = 0, i = \overline{1, m}, m < n$ ). При наличии ограничений минимум функции  $q(\mathbf{x})$  будет условным, при отсутствии – безусловным (сводится к определению и исследованию стационарных точек функции  $q(\mathbf{x})$ ). Классический способ решения данной задачи состоит в том, что уравнения  $f_i(\mathbf{x}) = 0, i = \overline{1, m}, m < n$  используются для исключения из рассмотрения  $m$  переменных. Целевая функция приводится к виду  $q(x_1, x_2, \dots, x_n) = q_1(y_1, y_2, \dots, y_{n-m}), y_1, y_2, \dots, y_{n-m}$  – неисключённые переменные. Задача сводится к нахождению значений  $y_1, y_2, \dots, y_{n-m}$ , которые обращают в минимум функцию  $q_1$  и на которые не наложено никаких ограничений (задача на безусловный экстремум). Если ограничения имеют сложный вид, то исключение с их помощью  $m$  переменных из функции  $q(\mathbf{x})$  представляет значительные трудности (поэтому задачи на условный экстремум и сводятся к задаче на безусловный и используется функция Лагранжа). При большом числе переменных угадывание допустимого базисного решения становится чрезвычайно трудоёмким (используются эффективные известные систематические методы получения допустимого базисного решения).

При определении рецептурно-технологических параметров композита, при которых достигается максимальное значение прочности на сжатие  $R_{сж}$ , сначала методами математического планирования эксперимента была получена аппроксимационная модель

$$R_{сж} = 2x_1 + 4x_2 - x_1^2 - 2x_2^2$$

в области факторного пространства

$$x_1 + 2x_2 - 8 \leq 0 \quad 2x_1 - x_2 - 12 \leq 0, \quad x_1, x_2 \geq 0.$$

Функция  $q(x_1, x_2)$  – выпуклая (сумма линейной функции  $y = -2x_1 - 4x_2$  и положительно-определённой квадратичной формы  $y = x_1^2 + 2x_2^2$ ). Система ограничений задачи включает только линейные неравенства, можно воспользоваться теоремой Куна – Таккера.

Функция Лагранжа:

$$L(x_1, x_2, \lambda_1, \lambda_2) = -2x_1 - 4x_2 + x_1^2 + 2x_2^2 + \lambda_1 (x_1 + 2x_2 - 8) + \lambda_2 (2x_1 - x_2 - 12);$$



необходимые и достаточные условия существования седловой точки:

$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{\partial L}{\partial x_1} = -2 + 2x_1 + \lambda_1 + 2\lambda_2 \geq 0, \\ p_2 &= \frac{\partial L}{\partial x_2} = -4 + 4x_2 + 2\lambda_1 - \lambda_2 \geq 0; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} -q_1 &= \frac{\partial L}{\partial \lambda_1} = x_1 + 2x_2 - 8 \leq 0, \quad -q_2 = \frac{\partial L}{\partial \lambda_2} = 2x_1 - x_2 - 12 \leq 0. \\ x_1 p_1 &= x_1(-2 + 2x_1 + \lambda_1 + \lambda_2) = 0, \quad x_2 p_2 = x_2(-4 + 4x_2 + 2\lambda_1 - \lambda_2) = 0; \\ \lambda_1 q_1 &= -\lambda_1(x_1 + 2x_2 - 8) = 0, \quad \lambda_2 q_2 = -\lambda_2(2x_1 - x_2 - 12) = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Введя дополнительные неотрицательные переменные  $v_1, v_2, w_1, w_2$ , обращающие неравенства (4) в равенства, получим:

$$\begin{aligned} p_1 - v_1 &= -2 + 2x_1 + \lambda_1 + 2\lambda_2 - v_1 = 0; \quad p_2 - v_2 = -4 + 4x_2 + 2\lambda_1 - \lambda_2 - v_2 = 0; \\ -q_1 + w_1 &= -8 + x_1 + 2x_2 + w_1 = 0, \quad -q_2 + w_2 = -12 + 2x_1 - x_2 + w_2 = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Из (6) следует:

$$\begin{aligned} x_1 &= 1 - \frac{1}{2}\lambda_1 - \lambda_2 + \frac{1}{2}v_1, \quad x_2 = 1 - \frac{1}{2}\lambda_1 + \frac{1}{4}\lambda_2 + \frac{1}{4}v_2; \\ w_1 &= 5 + \frac{3}{2}\lambda_1 + \frac{1}{2}\lambda_2 - \frac{1}{2}v_1 - \frac{1}{2}v_2, \quad w_2 = 11 + \frac{1}{2}\lambda_1 + \frac{5}{4}\lambda_2 - v_1 + \frac{1}{4}v_2. \end{aligned}$$

Отсюда базисное решение:

$$\begin{aligned} \lambda_1 = \lambda_2 = v_1 = v_2 = 0, \quad x_1 = 1, x_2 = 1, w_1 = 5, w_2 = 11; \\ p_1 = v_1 = 0, p_2 = v_2 = 0; \quad q_1 = w_1 = 5, q_2 = w_2 = 11. \end{aligned}$$

Откуда следует справедливость условий

$$x_1 p_1 = 0, \quad x_2 p_2 = 0; \quad \lambda_1 q_1 = 0, \quad \lambda_2 q_2 = 0; \quad x_1, x_2 \geq 0, \lambda_1, \lambda_2 \geq 0, \quad p_1, p_2 \geq 0, \quad q_1, q_2 \geq 0.$$

Так что  $(x_1^0, x_2^0, \lambda_1^0, \lambda_2^0) = (1, 1, 0, 0)$  является седловой точкой функции Лагранжа для исходной задачи;  $x^*(1, 1)$  – оптимальный план исходной задачи;  $q_{\min} = -3$ ;  $(R_{\text{сж}})_{\max} = 3$ . Использование условий Куна – Таккера оказалось эффективным и в ряде других случаев, связанных с синтезом композиционных материалов со специальными свойствами, а также с задачами управления в эргатических системах.

Трудности проектирования любой многоцелевой системы определяются сложностью ее иерархической структуры критериев качества. Цели, как правило, оказываются противоречащими друг другу. Даже зная цели, исследователь ещё не может приступить к решению оптимизационной задачи. Для того чтобы свести задачу к стандартной задаче оптимизации, необходимо сформулировать и дополнительные гипотезы, не вытекающие из постановки задачи. Наиболее сложная часть проблемы состоит в формализации цели. Решающими факторами при оценке эффективности системы являются: определение гипотез, описание динамических процессов в системе, а также трудности неформального характера. При проектировании систем на начальной стадии вынуждены исходить из непротиворечивости целей и подчинения целей подсистем низшего уровня целям подсистем более высокого уровня. Создание полной модели для сложной системы практически бесполезно, ибо она будет столь же сложной, как и сама система.

В общем случае построение математической модели системы неизбежно приводит к использованию системного подхода, главная концепция которого состоит в познании системы одновременно во всем комплексе проблем и на всех уровнях организации (в том числе с учетом влияния внешней среды).

Сложность системы определяется количеством и разнообразием элементов внутренних межэлементных связей и связей системы со средой. Уровень сложности в большей степени зависит от разнообразия связей элементов, чем от их количества. Нелинейные системы, как правило, являются сложными: нелинейность приводит к тому, что ее переменные не только зависят от времени, но и являются функциями других переменных и влияют друг на друга. Одной из важнейших задач оптимизации системы считается достижение максимальной организованности при той же сложности или уменьшении сложности при заданном уровне организованности. Для совершенствования организованности возможны два пути. Первый – экстенсивный, уменьшающий количество элементов и связей между ними, но повышающий сложность всей системы (в основном связан с разнородными, гетерогенными элементами); второй – интенсивный, приводящий к резкому увеличению количества элементов в системе и связей между ними (как правило, связан с однородными, гомогенными элементами).

Чем неопределеннее управление, чем меньше оно поддается алгоритмизации или формализации, тем сложнее системы и тем важнее роль человека по принятию управленческих решений [3].

#### **Выводы**

Определены общие принципы исследования систем с позиций разработки композиционных материалов: при традиционном подходе композит рассматривается как неструктурированная среда, а при системном – как структурированная (в строительном материаловедении – смена парадигмы).

Дан анализ новых альтернативных по отношению к традиционному математическому подходу методологических подходов для организации и накоплению знаний, к их переносу на новые объекты, процессы и явления.

Иллюстрируется использование условий Куна – Таккера при синтезе композиционных материалов со специальными свойствами.

#### **Список литературы**

1. Королев, Е.В. Перспективы развития строительного материаловедения / Е.В. Королев // Архитектура и строительство России. – 2020. – № 3. – С. 14.
2. Чернышов, Е.М. Проблема комплексности и системности качественного описания и статистической достоверности количественной оценки характеристик структуры строительных композитов / Е.М. Чернышов, А.И. Макеев // Эксперт: теория и практика. – 2022. – № 2 (17). – С. 75–80.
3. Прангишвили, И.В. Системный подход и общесистемные закономерности / И.В. Прангишвили. – Москва: СИНТЕГ, 2005. – 528 с.
4. Королев, Е.В. Системный анализ эволюции знаний о структурообразовании строительных материалов / Е.В. Королев, А.Н. Гришина, А.М. Данилов, А.М. Айзенштадт. – DOI 10.33622/0869-7019.2024.09.18-27 // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – №9. – С.18–27.
5. Будылина, Е.А. Системный подход и законы развития: синтез композитов / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов. – DOI 10.54734/20722958\_2024\_3\_19 // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – №3. – С.19–25.
6. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2. Ser. «2nd International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering». – 2017. – P. 012006.
7. Garkina, I. Modeling of kinetic processes in composite materials / I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, № 9. – P. 421–425.

8. Королев, Е.В. Применение теории информации в решении задач строительного материаловедения / Е.В. Королев, Ю.А. Беленцов // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 3 (56). – С. 13–28.
9. Королев, Е.В. Анализ структурообразования композитов с использованием фрактальной размерности / Е.В. Королев, А.Н., Гришина А.М. Айзенштадт // Строительные материалы. – 2020. – № 9. – С. 54–61.

#### References

1. Korolev, E.V. Prospects for the Development of Construction Materials Science / E.V. Korolev // Architecture and Construction of Russia. – 2020. – № 3. – P. 14.
2. Chernyshov, E.M. The Problem of Complexity and Systematicity of Qualitative Description and Statistical Reliability of Quantitative Assessment of Characteristics of the Structure of Building Composites / E.M. Chernyshov, A.I. Makeev // Expert: Theory and Practice. – 2022. – №2 (17). – P. 75–80.
3. Prangishvili, I.V. Systems approach and general systemic regularities / I.V. Prangishvili. – Moscow: SINTEG, 2005. – 528 p.
4. Korolev, E.V. Systems Analysis of the Evolution of Knowledge about the Structure Formation of Building Materials / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.M. Danilov, A.M. Aizenshtadt. – DOI 10.33622/0869-7019.2024.09.18-27 // Industrial and Civil Engineering. – 2024. – № 9. – P.18–27.
5. Budylna, E.A. Systems approach and development laws: synthesis of composites / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov. – DOI 10.54734/20722958\_2024\_3\_19 // Regional architecture and engineering. – 2024. – №3. – P.19–25.
6. Garkina, I.A. From the experience of development of composite materials with desired properties / I.A. Garkina, A.M. Danilov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2. Сер. «2nd International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering». – 2017. – P. 012006.
7. Garkina, I. Modeling of kinetic processes in composite materials / I. Garkina // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 8, № 9. – P. 421–425.
8. Korolev, E.V. Application of information theory in solving problems of construction materials science / E.V. Korolev, Yu.A. Belentsov // Regional architecture and engineering. – 2023. – № 3 (56). – P. 13–28.
9. Korolev, E.V. Analysis of structure formation of composites using fractal dimension / E.V. Korolev, A.N. Grishina, A.M. Aizenshtadt // Construction materials. – 2020. – № 9. – P. 54–61.

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства  
Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Береговой Виталий Александрович**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Технологии строительных  
материалов и деревообработки»

**Лавров Иван Юрьевич**,  
аспирант, ассистент кафедры «Технологии  
строительных материалов  
и деревообработки»

**Присевка Александр Сергеевич**,  
аспирант  
E-mail: techbeton@pguas.ru

Penza State University of Architecture  
and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Beregovoy Vitaly Aleksandrovich**,  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the Department «Building Materials  
and Woodworking Technology»

**Lavrov Ivan Yurievich**,  
Postgraduate, Assistant Lecturer of the  
Department «Building Materials and  
Woodworking Technology»

**Prisevka Aleksandr Sergeevich**,  
Postgraduate  
E-mail: techbeton@pguas.ru

## ФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ И ТЕПЛОПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ

В.А. Береговой, И.Ю. Лавров, А.С. Присевка

Дана оценка влияния рецептурных и технологических факторов на процесс нагрева и термического вспучивания гранулированных сырьевых шихт. Приведено обоснование выбора газообразователей для обеспечения равномерности распределения пор по сечению стеклокристаллического заполнителя. Сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных позволило выявить причины их расхождения применительно к процессу получения легких заполнителей с использованием углеродсодержащих газообразователей.

*Ключевые слова:* численное моделирование, стеклокристаллическая микроструктура, термическое вспенивание, газообразователи, легкие заполнители

## FORMATION OF A POROUS STRUCTURE AND HEAT-CONDUCTING PROPERTIES OF GLASS-CRYSTAL FILLERS

V.A. Beregovoy, I.Yu. Lavrov, A.S. Prisevka

An assessment of the influence of prescription and technological factors on the process of heating and thermal swelling of granulated raw materials is presented. The rationale for the choice of gas-forming agents to ensure the uniformity of the pore distribution over the cross-section of the glass-crystal filler is given. A comparison of the results of numerical modeling and experimental data makes it possible to identify the reasons for their discrepancy in relation to the process of obtaining light aggregates using carbon-containing gas generators.

*Keywords:* numerical modeling, glass crystal microstructure, thermal foaming, gas-forming agents, light fillers

Нехватка во многих регионах страны производственных мощностей по выпуску легких заполнителей строительного назначения сдерживает внедрение в практику производства энерго- и ресурсосберегающих ограждающих конструкций [1]. В этой связи актуальным направлением является усовершенствование рецептур существующих сырьевых шихт искусственных пористых заполнителей путем применения местных месторождений природного сырья [2].

При проведении экспериментальной части использовались природная опока Сурско-Маисского месторождения (Пензенская обл.) следующего оксидного (минерально-

фазового состава), % мас: SiO<sub>2</sub> (73,94), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(7,73), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(4, 19), R<sub>2</sub>O (2), CaO+MgO (2,4); кремнезём (61), Са-сметит (21), α-кварц (11), К-Na-полевой шпат (4), кристобалит (2), Na-плагиоклаз (альбит) (1).

Вспенивание расплава формирующегося пеностекла и его отверждение происходит в результате совместно протекающих физических и химических процессов. Простой и наименее энергоёмкой для практической реализации является одностадийная схема получения материала, совмещающая в едином временном интервале процессы синтеза стеклокристаллической микроструктуры, образования расплава и газообразной фазы. Кинетика процессов структурообразования зависит от выбора газообразователя, формирующего пористую структуру и комплекс важнейших эксплуатационных показателей материала (теплопроводность, термостойкость, теплоемкость, прочность, долговечность и др.). Схема протекания основных физических и химических процессов в рамках технологии получения легкого заполнителя представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема последовательности процессов формирования структуры вспененного стеклокристаллического материала

Очевидно, что при формировании вспененных гранул температурно-временные границы отдельных стадий должны составлять единый системный ряд следующих взаимодополняющих процессов (см. рис. 1):

- нагрев материала с началом выделения газообразной фазы в виде паров, возникающих в процессе десорбции минеральных компонентов и удаления кристаллизационной воды;
- нагрев с образованием минерального расплава и вторичное выделение газа при термолитизе компонентов смеси, плавление большей части компонентов смеси и продуктов их реакций; снижение вязкости расплава с образованием непрерывной вязкоподвижной матрицы;
- насыщение расплава парогазовой смесью, а также веществами с функцией ПАВ;
- образование дисперсии ячеек и их временная стабилизация за счет ПАВ, а также вязкости системы;
- диффузия газов и объединение смежных ячеек с тенденцией к их неуправляемому росту и всплытию по мере снижения вязкости расплава;
- охлаждение и фиксация параметров структуры конечного материала.

На этапе обжига кинетика процесса перемещения фронта вспученного материала к центру гранулы влияет на качество и характер распределения пор по сечению (рис. 2).

Расчет температурных полей, возникающих в гранулированных сырьевых смесях при обжиге, осложнен большим числом взаимосвязанных факторов тепломассопереноса [3]. В этой связи оценку скорости процесса нагревания, обеспечивающего эффективность вспучивания гранул, производили в приближенной постановке. Цель состояла в феноменологическом описании характера влияния отдельных рецептурно-технологических факторов на время формирования ячеистой структуры по сечению обжигаемой гранулы с последующим численным моделированием процесса и анализом полученных результатов.

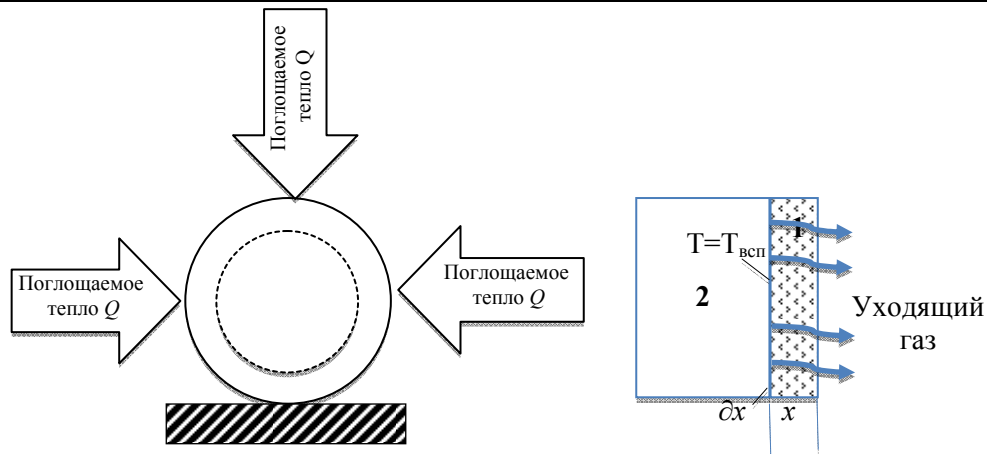


Рис. 2. Схема нагрева и формирования пористой структуры гранул

В общем случае количество тепла, поглощаемого на нагрев материала до температуры вспенивания ( $T_{всп}$ ) в единицу времени, составит:

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} = q_{всп} S \frac{\partial x}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где  $q_{всп}$  – удельный расход тепла на пиропластическое вспенивание.

Скорость перемещения границы вспучивания лимитируется интенсивностью теплового потока, обусловленного теплопроводящими свойствами внешней зоны гранулы:

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} S \rightarrow q_{всп} S \frac{\partial x}{\partial \tau} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} S. \quad (2)$$

В случае характера потока, близкого к стационарному, имеем:

$$q_{всп} \frac{\partial x}{\partial \tau} = -\lambda \frac{(t_x - t_c)}{x}. \quad (3)$$

Интегрирование (3) в пределах вспученной зоны даёт следующую зависимость:

$$\tau = -\frac{q_{всп}}{\lambda(t_x - t_c)} \int_0^x x dx = \frac{q_{всп} x^2}{2\lambda|t_x - t_c|}. \quad (4)$$

Удельный расход теплоты на вспучивание  $q_{всп}$  складывается из затрат на нагрев материала гранулы от начальной температуры до температуры вспучивания, а также плавление компонентов системы, потери с уходящими газами, эндотермические эффекты синтеза новых минеральных соединений и т.п.

$$q_{всп} = \rho_m c_m (t_c - t_{всп}) + \sum_{i=1}^n Q_i + c_r \rho_r t_r G_r, \quad (5)$$

где  $G_r$  – нецелевой расход газообразной фазы (потери при вспучивании), отн. ед.;

$c_m$  и  $c_r$  – удельная теплоемкость материала гранулы и газообразной фазы;  $\sum_{i=1}^n Q_i$  – суммарный тепловой эффект, который можно выразить через изменение плотности материала [4]:

$$Q = \Delta H \frac{d\rho}{d\tau}; \quad (6)$$

здесь  $\Delta H$  – тепловой эффект термического превращения.

В работе [5] зависимость  $\frac{d\rho}{d\tau}$  сведена до уравнения

$$\frac{d\rho}{d\tau} = -Z(\rho - \rho_k) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (7)$$

где  $Z$  – предэкспоненциальный множитель;  $\rho_k$  – конечная средняя плотность материала;  $E$  – энергия активации процесса разложения.

На этапе начального нагрева гранулы процесс повышения температуры фронта вспенивания до  $T_{всп}$  не является стационарным. Кинетика роста температуры для одномерного тела описывается уравнением Фурье

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{\lambda_i}{c_i \rho_i} \frac{d^2T}{dx^2} = \alpha_i \frac{d^2T}{dx^2}. \quad (8)$$

Одним из способов решения уравнения является использование критерия подобия  $F_0 = \frac{\alpha\tau}{R^2}$ , где  $R$  – средний радиус гранул обжигаемой гранулы. При этом значение  $F_0$  находится по номограммам с использованием значений безразмерной температуры ( $\theta$ ) и координаты зоны прогрева от поверхности ( $\frac{x}{R}$ ).

Индекс ( $i$ ) в уравнении (8) указывает на необходимость учета изменения теплофизических свойств двух сильно отличающихся структурных зон (рис. 2). Первая, находящаяся ближе к поверхности, на момент времени  $\tau$  вспучилась и сформировала пористую структуру. Теплопроводность пористого материала складывается из теплопроводности материала оболочки (межпоровых перегородок) и капсулированной внутри парогазовой фазы. При качественном вспучивании отдельные ячейки стеклокристаллического материала достаточно хорошо изолированы друг от друга, и массопереносом можно пренебречь.

Теплопроводность вновь образованного вспененного стеклокристаллического материала ( $\lambda_1$ ) зависит от теплопроводности материала межпоровых перегородок  $\lambda_c$ , относительного содержания и теплопроводности газовой фазы:

$$\lambda_1 = \lambda_c (1 - \Pi) + \lambda_{r(t_{всп})} \Pi, \quad (9)$$

где  $\Pi$  – пористость гранулы,  $\Pi = \left(1 - \frac{\rho_m}{\rho_1}\right)$ ;  $\rho_m$  и  $\rho_1$  – средняя и истинная плотность стеклокристаллического материала;  $\lambda_{r(t_{всп})}$  – теплопроводность смеси газов внутри ячейки при температуре вспенивания (для разработанных материалов  $t_{всп} = 850$  °С (см. рис. 4)), тогда  $\lambda_{r(t_{всп})} = 0,074$  Вт/(м·°С), теплопроводность и теплоемкость материала межпоровых перегородок можно принять равными показателям стекловидной составляющей, определяемым по правилу аддитивности с учетом температуры вспучивания [6];

$$\lambda_c = 0,01 \sum_{i=1}^n \lambda_i P_i; \quad C_c = 0,01 \sum_{i=1}^n C_i P_i, \quad (10)$$

где  $C_c$ ,  $\lambda_c$  – значения величин при 0 °С;  $C_i$  ( $\lambda_i$ ) – константы, значения которых для оксидов, входящих в состав разработанных материалов, равны: SiO<sub>2</sub> – 0,8015 (0,87), Na<sub>2</sub>O – 1,1204 (1,28), K<sub>2</sub>O – 0,7793 (0,58), CaO – 0,7973 (1,16), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,8690 (1,07);  $P_i$  – содержание оксидов, %.

Зависимости для коррекции значений теплофизических свойств в интервале температур 0 до 1300 °С имеют вид [6]:

$$C_{c(t)} = C_c (1 + 0,00039 \cdot t); \lambda_{c(t)} = \lambda_c (1 + 0,0009 \cdot t), \quad (11)$$

где  $C_{c(t)}$  и  $\lambda_{c(t)}$  – удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности при расчетной температуре.

Для повышения точности используют уравнения более сложного вида. Например, Шарп и Гинтер предложили гиперболическую зависимость теплоемкости стекла от состава и температуры, дающую удовлетворительные результаты в температурном интервале от –200 до +1300 °С [6, 7]:

$$C_{c(t)} = \frac{\sum p_i (\alpha_0 t + C_0)}{0.00146t + 1}, \quad (12)$$

где значения  $\alpha_0$  и  $C_0$  находятся по формулам аддитивности со следующими численными величинами для входящих параметров  $\alpha_i$  ( $C_i$ ): SiO<sub>2</sub> – 0,001960 (0,6938); Na<sub>2</sub>O – 0,003471 (0,9333), CaO – 0,001717 (0,7155). По аналогии с уравнением (11) определяем теплоёмкость двухкомпонентной системы:

$$C_1 = C_c (1 - \Pi) + C_{r(t_{всп})} \Pi, \quad (13)$$

где  $C_{r(t_{всп})}$  – удельная изобарная теплоемкость парогазовой смеси внутри ячейки при температуре вспенивания ( $C_{r(t_{всп})} = 1,164$  кДж/(кг °С)).

Теплопроводность материала в области (2) (рис. 2) определяется теплофизическими показателями компактированной сырьевой шихты. Для ее оценки подходят известные зависимости теплопроводности строительных материалов от их средней плотности [6].

Таким образом, неравномерность распределения ячеистой структуры по сечению материала (фото 1) и возникновение дефектов являются следствием следующих факторов, проистекающих из особенностей рецептур и технологических факторов:

- значительный градиент температурного поля по сечению гранулы, возникающий как результат резкого увеличения термосопротивления на пути теплового потока по мере увеличения глубины и снижения теплопроводности вспученной зоны;
- неравномерное распределение натрийсодержащих солей после высушивания гранул, приводящее к повышению степени остекловывания наружных зон гранул (фото 2);
- наличие в материале различных по энергетическому потенциалу источников, поглощающих или выделяющих тепло в процессе вспенивания, и неравномерность их распределения по объему;
- способность рецептур образовывать минеральный расплав с оптимальной вязкостью в диапазоне  $T_{всп}$ ;
- наличие у газообразователя и (или) продуктов его термического расположения функции высокотемпературного ПАВ с эффектом стабилизации вспененного расплава.

С учетом перечисленных выше факторов применение минеральных газообразователей на основе CaCO<sub>3</sub> увеличивает вероятность формирования дефектной структуры при обжиге, поэтому в данной работе рассматривали углеродсодержащие компоненты.

Внешний вид гранул, полученных из различных вариантов экспериментальных составов, показан на фото 1.



Фото 1. Гранулы экспериментальных составов (см. таблицу): 1; 4; 5; 6





Фото 2. Высолы на поверхности сырьевой смеси

Рецептуры экспериментальных составов

Материал	Количество материала, мас. %, в составе						
	базовый	Модифицированные					
		1	2	3	4	5	6
Опока	75	66	61	64,8	64,1	65	65
NaOH	-	8	-	7,7	7,7	7,7	7,7
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-	-	10.3	-	-	-	-
Вода	25	25	26	25,6	23,1	22	23
Глицерин	1	1	0.9	1,95	1,3	-	-
Уголь (кам.)	-	-	-	-	-	1	-
Сахар	-	-	-	-	-	-	2
KNO <sub>3</sub>	-	-	1.8	-	-	-	-
Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	-	-	-	-	3,84	-	-

Более точный прогноз кинетики распространения теплового потока возможен при учете суммарного теплового эффекта, возникающего в результате протекания структурообразующих процессов (параметр  $\sum_{i=1}^n Q_i$  в уравнении (5)). Для этого рассмотрим модельную систему, состоящую из стальной подложки, покрытой слоем материала с изменяемой в процессе нагрева структурой. В работе [5] авторы приводят расчетную кривую аналогичного процесса, показанную на рис. 3.

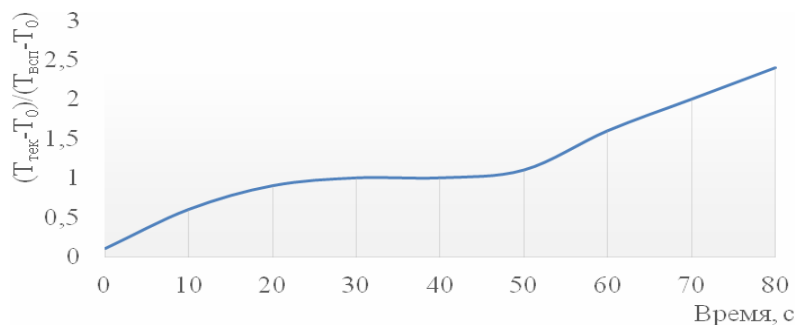


Рис. 3. Термограмма нагрева модельной системы

На термограмме выделяются три основных этапа нагрева подложки под слоем материала, вспенивающегося от воздействия нестационарного теплового потока. На начальном участке температура растет прямолинейно до достижения  $T_{всп}$ , затем появляется плато, обусловленное поглощением тепла за счет затрат на энергию активации процесса разложения составляющих шихты и выделения вспенивающей газобразной фазы.

Исходя из особенностей термометрии процесса и значения влияния его характера на качество вспенивания определенным интересом представляет оценка степени

торможения нагрева при взаимодействии углеродсодержащего газообразователя и кислорода по реакции окисления  $C + O_2 = CO_2 + Q$ . При гетерогенном горении углерода реакция протекает на его поверхности, к которой поступают молекулы кислорода из газового объема. Изменение констант скоростей реакций в зависимости от температуры подчиняется закону Аррениуса, для каждой ( $i$ -й) гетерогенной реакции справедливо равенство [8, 9]

$$\frac{dG_i}{d\tau} = C_i k_{0i} e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (14)$$

где  $G_i$  – количество  $i$ -го реагирующего вещества, моль/(м<sup>2</sup>·с);  $C_i$  – текущая концентрация газовой компоненты, моль/м<sup>3</sup>;  $E_i$  – энергия активации реакции;  $k_{0i}$  – предэкспоненциальный множитель (вероятностный фактор).

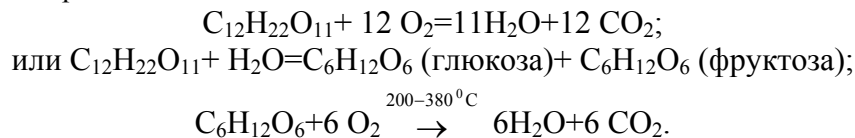
Кинетические константы реакций горения ( $E$  и  $k_0$ ) индивидуальны для каждого топлива и зависят от структуры, а также строения углеродного материала. Для приведенной выше реакции энергия активации окисления коксов различных топлив имеет следующие значения, кДж/моль [9]: древесный уголь (75...84); торф (85); каменный уголь (115...135); тощий уголь и антрацит (140...146); электродный уголь (167).

Зависимость предэкспоненциального множителя от величины энергии активации имеет вид [8]:

$$\lg k_{0i} = 0.20810^{-4} E_i + 1. \quad (15)$$

Принимая тот факт, что энергия активации – это главный фактор, определяющий скорость реакции (уменьшение  $E_i$  ускоряет протекание процесса), для повышения эффективности вспенивания предпочтительно использовать древесный уголь, торф или каменный уголь.

В работе в качестве углеродсодержащего газообразователя апробирован сахар (ТС 3), который при нагревании проходит стадии плавления (180 °С) и термоллиза с выделением газопаровой смеси



Процесс окисления сахарозы происходит относительно медленно. Для его ускорения используют катализаторы в виде золы, а также других соединений (соли лития, натрия и кальция). Наличие щелочного активатора опоки в составе экспериментальных шихт (табл. 1) способствует снижению порогового значения энергии активации процесса горения сахара. Очевидно, во внутренних слоях гранул добавка сгорает не полностью, в результате образуется чёрная масса из продуктов неполного окисления сахара, состоящая из сложных органических веществ (альдегиды, кетоны, карбоновые кислоты), а также углерода. Некоторые из указанных продуктов способны выполнять функцию стабилизирующего ПАВ для пены [10].

Анализ приведенных выше данных показывает, что скорость вспучивания за счет окисления углеродного газообразователя существенно зависит от типа и степени помола кокса, а также пористости гранулы, влияющей на параметр  $C_i$ . Это связано с тем, что пористость гранулы лимитирует интенсивность обменных процессов окислителя с поверхностью кокса. Очевидно, что минимальная температура самовоспламенения углерода характерна для стехиометрической смеси, в которой скорость тепловыделения максимальна. По мере заглубления фронта вспучивания и остекловывания поверхности количество поступающего внутрь гранулы воздуха уменьшается, что закономерно приводит к росту минимальной температуры начала окисления газообразователя. В результате создаются предпосылки для запаздывания термоллиза частиц газообразователя внутренней части с последующим лавинообразным нарастанием процесса при достижении температур порядка 750...800 °С, что может привести к

возникновению дефектов ячеистой структуры в виде раковин и внутренних полостей (фото 1).

Логичным вариантом решения является введение в состав сырьевой смеси двухкомпонентного газообразователя, включающего добавки, выделяющие кислород при термоллизе. В рамках технологии искусственных пористых заполнителей интерес представляют вещества, термическая диссоциация которых совпадает с диапазоном обжига и имеет постепенный (ступенчатый) характер процесса. Дополнительно принимались во внимание минимальная температура начала окисления углерода в коксе (450 °С) и максимальная температура обжига стеклогранул (800...850 °С), полученная в ходе опытов (рис. 4).

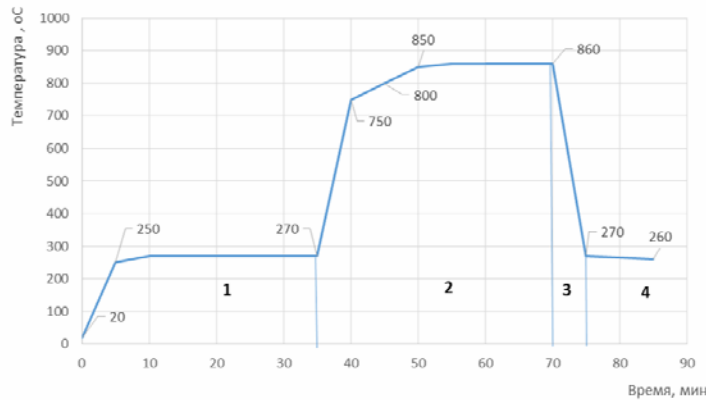


Рис. 4. Экспериментальный режим обжига гранул:

1 – прогрев; 2 – вспучивание; 3 – фиксация макроструктуры; 4 – охлаждение

С учетом вышеизложенного в практическом плане целесообразно исследовать возможности следующих добавок:

1. На основе оксидов марганца и железа. Термограмма пиролюзита (MnO<sub>2</sub>) – доступного и широко применяемого в различных производственных процессах окислителя, вырабатываемого из марганцевой руды, приведена на рис. 5.

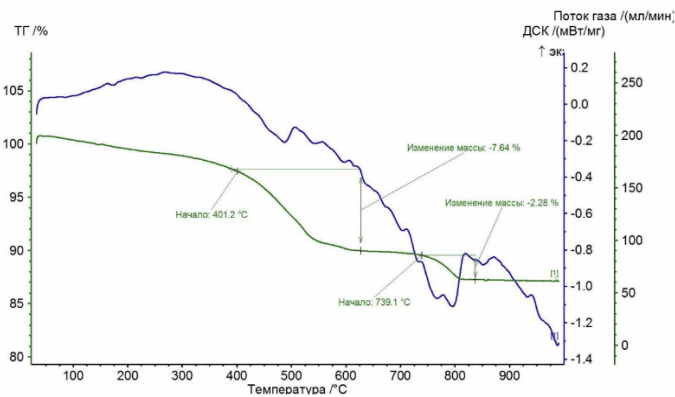
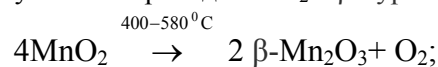


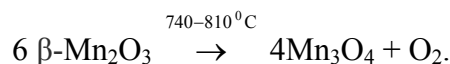
Рис. 5. Термограмма пиролюзита [11]

Анализ указывает на ступенчатый характер термоллиза пиролюзита:

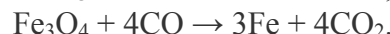
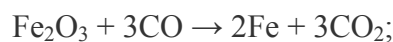
– на начальном участке (до 400...580°С) происходит постепенное удаление физически и адсорбционно связанной воды, а затем наблюдается стремительное уменьшение массы навески в результате перехода MnO<sub>2</sub> в β-курнакит по реакции [12]



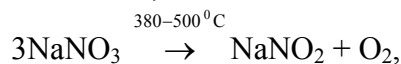
– повторное ускорение процесса термоллиза происходит в диапазоне 730...800 °С с протеканием реакции



В качестве природного окислителя можно рассмотреть легкоплавкие глины с высоким содержанием оксидов железа (II, III), способные при нагревании проявлять окислительные свойства:



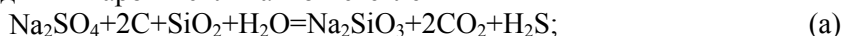
2. Натриевые соли азотной кислоты, выделяющие кислород при термоллизе:



Выделяющийся оксид натрия в дальнейшем поглощает  $\text{CO}_2$  с образованием  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , способствуя повышению эффективности окисления газообразователя на основе углерода кокса.

3. Сульфатсодержащие стекла (порошок). Окисляющим компонентом выступает трехокись серы ( $\text{SO}_3$ ), содержащаяся во всех технических стёклах в количестве 0,1...0,5 %. По данным Демидовича Б.К. [10], восстановление  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  углеродом в производстве пеностекла идет по следующим реакциям:

– в атмосфере водяных паров в силикатном стекле



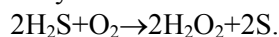
– при отсутствии водяных паров



Сернистый водород способен окисляться кислородом:



В случае избытка углерода в замкнутой ячейке окисление идет с образованием серы:



В рамках технологической сырьевой системы «опока – щелочной активатор – углеродный газообразователь» интерес представляет процесс, описываемый реакцией (а). Согласно уравнению реакции образуется силикат-глыба, которая в атмосфере водяных паров, скапливающихся внутри гранулы на начальных этапах обжига, способна образовывать Na-жидкие стекла, существенно повышающие способность гранул к термическому вспучиванию. Очевидно, вспучивание жидкого стекла связано с образованием водяного пара при нагреве до  $300^\circ\text{C}$  (рис. 6). На это указывают три эндотермических пика, обусловленных процессами удаления различных форм жидкой фазы: свободной и адсорбированной влаги из структуры  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  ( $t_1=116,8^\circ\text{C}$ ); кристаллизационной воды ( $t_2=164^\circ\text{C}$ ); гидратной воды с образованием  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ( $t_3=243^\circ\text{C}$ ). Экзотермические эффекты при  $640$  и  $797^\circ\text{C}$  указывают на протекание структурообразующих процессов и образование аморфного кремнезема:

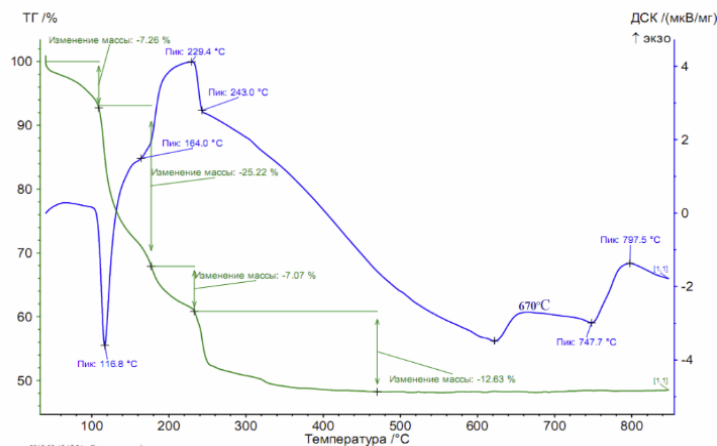
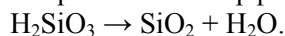


Рис. 6. Термограмма жидкого стекла [13]

Необходимо также отметить, что углерод способен проявлять свойства восстановителя и самостоятельно взаимодействовать с щелочным активатором опочной массы (NaOH) с выделением газообразных продуктов по реакции [14]:



Проблематика математического моделирования процессов теплопереноса, осложнённого фазовыми переходами, освещена в ряде научных работ [15, 16]. В современных публикациях для решения таких задач широко применяют инструментарий численного моделирования, основанный на приближенных методах (конечных разностей и конечных элементов). При построении расчетной модели использовали подход Стефана, предусматривающий фиксированную наружную поверхность, относительно которой происходит постепенное заглужение фронта вспенивания к центру гранулы. В качестве механизма реализации фазового перехода принята его локализация на поверхности тонкого слоя температур вспенивания.

Численное моделирование осуществлялось в ПО «COMSOL Multiphysics 6» с использованием модуля «Heat Transfer in Solids». Использовался нестационарный решатель «Time Dependent», моделирование производилось во временном диапазоне 0...250 секунд, при шаге 1 секунда. Для сокращения требуемых вычислительных ресурсов задача решалась в двухмерной постановке. В качестве геометрической модели был задан круг диаметром 10 мм, что, как показали результаты опытов, является оптимальным диаметром для эффективного вспучивания гранул при нагреве. Нагревание моделировалось за счёт задания по периметру круга постоянной температуры среды 850 °С, а начальная температура материала составляла 20 °С. Результаты моделирования представлены на рис. 7.

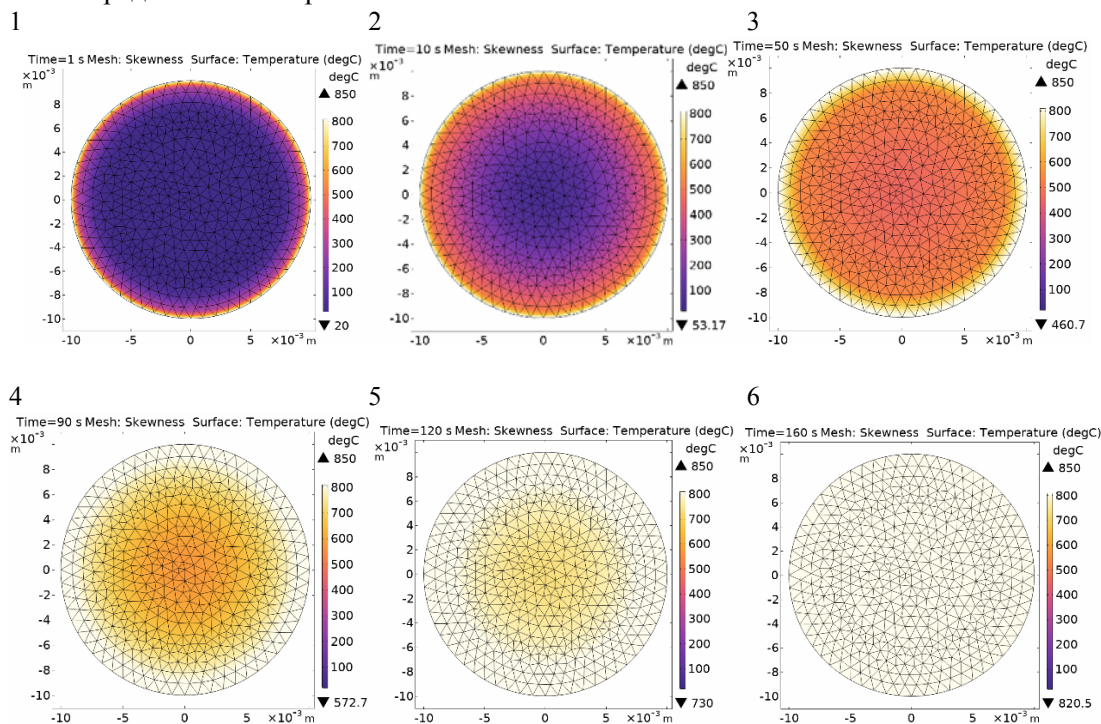


Рис. 7. Результаты численного моделирования нагрева гранулы шихты: номерами обозначено время термического воздействия – 1 (1с); 2 (10с); 3 (50с); 4(90с); 5(120с); 6(160с)

По результатам моделирования (рис. 7) можно выделить следующие характерные стадии: первичный прогрев гранулы (1, 2), при котором не происходит заметного увеличения глубины вспучивания; интенсификация вспучивания (3-5) с продолжением прогрева объёма гранулы; полный переход в пористое состояние (6) с продолжающимся нагревом материала.

Удельная теплоёмкость материала  $C_t$ , Дж/(кг·°С), задавалась с учетом температуры нагрева по зависимости (11). Коэффициент теплопроводности материала  $\lambda_t$  также

является температурно-зависимой величиной и определялся кусочно-заданной функцией с учетом теплопроводности двух структурных зон по сечению гранулы (рис. 2):

$$\lambda = \begin{cases} 0,8 \cdot (1 + 0,0009 \cdot T), & \text{при } T < 810; \\ 0,05 \cdot (1 + 0,0009 \cdot T), & \text{при } T \geq 810. \end{cases}$$

Средняя плотность материала задавалась  $2200 \text{ кг/м}^3$  (при температурах ниже  $810 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и  $300 \text{ кг/м}^3$  (при температурах более  $810 \text{ }^\circ\text{C}$ ), что имитирует процесс термического перехода материала из состояния компактированной шихты в пористое стекло, плотность гранул которого была исследована ранее (рис. 8).

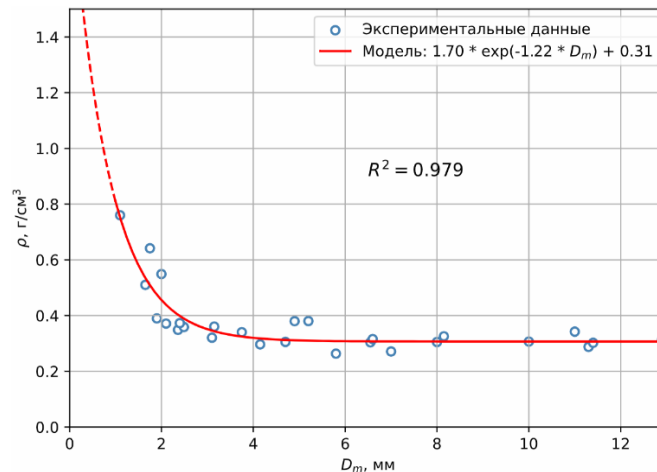


Рис. 8. Зависимость средней плотности пеностекла от диаметра гранулы

Геометрическими изменениями, происходящими с гранулой при указанном переходе в данных условиях моделирования, пренебрегали. Кроме того, поскольку структурный переход материала в пористое состояние осуществляется не мгновенно, полученное при моделировании оптимальное время обжига несколько меньше реально необходимого при технологическом процессе. Кинетика процессов прогрева гранулы и перемещения фронта вспучивания материала, полученная в результате моделирования, приведена на рис. 8. Натурные эксперименты обжига гранул показали, что интенсивное вспучивание материала достигается при длительности их экспозиции в печи ( $850 \text{ }^\circ\text{C}$ ) в течение  $240 \dots 260 \text{ с}$ . Очевидно, помимо увеличения длины пути теплового потока за счет роста объема гранул при вспучивании необходимо также учитывать дополнительное время, затрачиваемое на активацию структурообразующих процессов, включая запаздывание окисления углерода внутренней части.

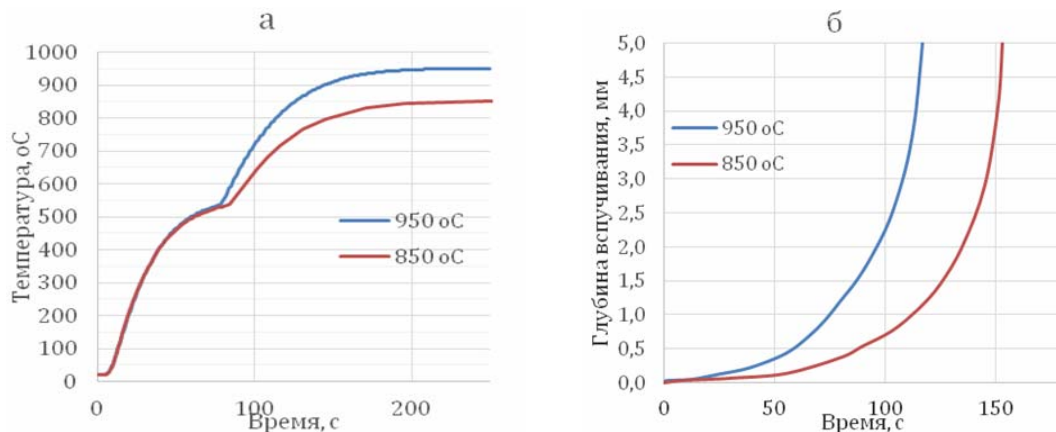


Рис. 9. Результаты моделирования:  
а – термограмма геометрического центра гранулы;  
б – изменение глубины вспучивания в процессе обжига

**Выводы.** Использование углеродсодержащих газообразователей, в том числе технического сахара (ТСЗ), повышает эффективность термического вспенивания опокосодержащих гранул. При выборе газообразователя необходимо учитывать разницу в величинах энергии активации процесса окисления углерода для различных типов сырья, а также наличие компонентов-катализаторов в составе шихты.

Равномерность распределения ячеек по сечению гранул с углеродным газообразователем повышается при введении добавок, проявляющих окислительные свойства в процессе термолиза.

Перспективность применения в качестве активатора процесса газообразования тонкомолотых сульфатсодержащих стекол обусловлена процессом первичного восстановления  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  углеродом, сочетающегося с синтезом  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , проявляющего максимальный порообразующий эффект на начальном этапе вспучивания ( $300^\circ\text{C}$ ).

Численное моделирование позволяет осуществлять первичную оценку кинетики процессов вспучивания гранул при обжиге. Для повышения сходимости расчётных значений и экспериментальных данных необходимо дополнительно учесть следующие факторы: увеличение длины пути теплового потока за счет вспучивания гранул; затраты времени на активацию структурообразующих процессов; запаздывание начала процесса окисления углерода внутренней части гранулы.

### Список литературы

1. Береговой, А.М. Показатели эффективности в системном анализе теплотерь через энергосберегающие наружные ограждения / А.М. Береговой, О.Л. Викторова, В.А. Береговой // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 5. – С. 57–61.
2. Береговой, В.А. Облегченная керамика повышенной прочности для энергоэффективных ограждающих конструкций / В.А. Береговой, Е.В. Снадин // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 4. – С. 54–59.
3. Лыков, А.В. Теплообмен: справочник / А.В. Лыков. – Москва: Энергия. 1978. – 480 с.
4. Коптелов, А.А. Расчет необходимых толщин разлагающихся теплозащитных покрытий на основе полимеров / А.А. Коптелов, Ю.В. Зеленев, В.И. Хромов // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2003. – Т.46, В.1. – С. 70–74.
5. Anderson, Ch. Intumescent Reaction Mechanisms / Ch. Anderson, J. Dziuk, W. Mallow, J. Buckmaster // J. of Fire Science. – 1985. – No.3. – P.161.
6. Беседин, П.В. Исследование и оптимизация процессов в технологии цементного клинкера / П.В. Беседин, П.А. Трубаев. – Белгород: БелГТАСМ, 2004. – 420 с.
7. John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook, Phlogiston Press, Cambridge, Massachusetts, U.S.A. 10.07.2019 ([web.mit.edu/lienhard/www/АНТТv500.pdf](http://web.mit.edu/lienhard/www/АНТТv500.pdf))
8. Неханов, С.А. Физико-химия вспенивающихся огнезащитных покрытий на основе полифосфата аммония / С.А. Неханов, В.П. Пименов // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – №8. – С. 11–58.
9. Виленский, Т.В. Динамика горения пылевидного топлива (исследования на электронных вычислительных машинах) / Т.В. Виленский, Д.М. Хзмалян. – Москва: Энергия, 1978. – 248 с.
10. Демидович, Б.К. Пеностекло / Б.К. Демидович. – Минск: Наука и техника, 1975. – 247 с.
11. Ергалиев, Р.Т. Исследование термолиза ацетата, оксалата, формиата и диоксида марганца / Р.Т. Ергалиев, В.С. Корзанов, М.П. Красновских, А.А. Лущиков // Вестник Пермского университета. – №2. – 2017. – С. 152–156.
12. Лидин, Р.А. Константы неорганических веществ: справочник / Р.А. Лидин, Л.Л. Андреева, В.А. Молочко. – Москва: Дрофа, 2006. – 685 с.
13. Суровцев, И.С. Влияние термического воздействия на свойства водного раствора силиката натрия / И.С. Суровцев, Т.Д. Никулина, В.А. Поляков, О.Б. Рудаков // Научный Вестник ВГАСУ. – 2012. – №5. – С. 2–7.

14. Sharma, B.K. Objective Question Bank in Chemistry / B.K. Sharma. – Krishna Prakashan Media, 1997. – 126 p.
15. Гусейнов, Ш.Э. Метод сведения обобщенной задачи Стефана к нелинейному интегро-дифференциальному уравнению типа Вольтерра / Ш.Э. Гусейнов // Computer Modelling and New Technologies. – 2006. – Vol.10, №.2. – С. 57–67.
16. Селезнева, Н.В. Математическое моделирование температурных полей многослойных тел при экстремальных тепловых воздействиях / Н.В. Селезнева // Системні технології. – 2010. – В. 2. – С. 67–73.

## References

1. Beregovoy, A.M. Efficiency indicators in the system analysis of heat loss through energy-saving external fences / A.M. Beregovoy, O.L. Viktorova, V.A. Beregovoy // Izvestia of higher educational institutions. Construction. – 2009. – № 5. – P. 57–61.
2. Beregovoy, V.A. Lightweight high-strength ceramics for energy-efficient enclosing structures / V.A. Beregovoy, E.V. Snadin // Regional architecture and engineering. – 2017. – № 4(33). – P. 54–59.
3. Lykov, A.V. Heat and Mass transfer: handbook / A.V. Lykov. – Moscow: Energiya, 1978. – 480 p.
4. Koptelov, A.A., Calculation of the required thicknesses of decomposing thermal protective coatings based on polymers / A.A. Koptelov, Yu.V. Zelenev, V.I. Khromov // Izv. vuzov. Chemistry and chemical technology. – 2003. – Vol. 46, Issue 1. – P. 70–74.
5. Anderson, Ch. Intumescent Reaction Mechanisms / Ch. Anderson, J. Dziuk, W. Mallow, J. Buckmaster // J. of Fire Science. – 1985. – No.3. – P.161.
6. Besedin, P.V. Research and optimization of processes in cement clinker technology / P.V. Besedin, P.A. Trubaev. – Belgorod: BelGTASM, 2004. – 420 p.
- 7 John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook, Phlogiston Press, Cambridge, Massachusetts, U.S.A. 10.07.2019 (web.mit.edu/lienhard/www/AHTTv500.pdf)
8. Nekhanov, S.A. Physico-chemistry of foaming flame retardant coatings based on ammonium polyphosphate / S.A. Nekhanov, V.P. Pimenov // Fire and explosion safety. – 2010. – No.8. – P. 11–58.
9. Vilensky, T.V. Dynamics of gorenje pulverized fuel (research on electronic computers) / T.V. Vilensky, D.M. Khzmalyan. – Moscow: Energiya, 1978. – 248 p.
10. Demidovich, B.K. Foam glass / B.K. Demidovich. – Minsk: Science and Technology, 1975. – 247 p.
11. Ergaliev, R.T. Investigation of thermolysis of acetate, oxalate, formate and manganese dioxide / R.T. Ergaliev, V.S. Korzanov, M.P. Krasnovskikh, A.A. Lushikov // Bulletin of the Perm University. – No.2. – 2017. – P. 152–156.
12. Lidin, R.A. Constants of inorganic substances: handbook / R.A. Lidin, L.L. Andreeva, V.A. Molochko. – Moscow: Bustard, 2006. – 685 p.
13. Surovtsev, I.S. The effect of thermal action on the properties of an aqueous solution of sodium silicate / I.S. Surovtsev, T.D. Nikulina, V.A. Polyakov, O.B. Rudakov // Scientific Bulletin of the VSUACE. – 2012. – No.5 – P. 2–7.
14. Sharma, B.K. Objective Question Bank in Chemistry / B.K. Sharma. – Krishna Prakashan Media, 1997. – 126.
15. Huseynov, S.E. Method of reducing the generalized Stefan problem to a nonlinear integro-differential equation of the Volterra type / S.E. Huseynov // Computer Modeling and New Technologies. – 2006. – Vol.10, No.2. – P. 57–67.
16. Selezneva, N.V. Mathematical modeling of temperature fields of multilayer bodies under extreme thermal influences / N.V. Selezneva // System technology. – 2010. – Vol. 2. – P.67–73.



УДК 691.327.3

DOI 10.54734/20722958\_2025\_1\_56

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Макридин Николай Иванович,**  
доктор технических наук, главный научный  
сотрудник научно-исследовательского  
сектора

**Максимова Ирина Николаевна,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Управление качеством»  
E-mail: maksimovain@mail.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Makridin Nikolai Ivanovich,**  
Doctor of Sciences, Researcher of the  
Research Sector

**Maksimova Irina Nikolaevna,**  
Candidate of Science, Associate Professor of  
the Department «Management of Quality»  
E-mail: maksimovain@mail.ru

## ДЕФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЛЕГКОГО КОНСТРУКЦИОННОГО БЕТОНА ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ

Н.И. Макридин, И.Н. Максимова

Испытывается растворная составляющая легкого конструкционного бетона на деформативность и прочность. Исследуются напряженно-деформированное состояние структуры бетона на моделях; влияние возраста и условий длительного нагружения на деформативность и прочность керамзитобетона. Изучается изменение структурных и прочностных характеристик керамзитобетона при циклическом воздействии повышенных температур. Рассматриваются вопросы формирования структуры пористых заполнителей и легких бетонов различного назначения, включая определение силовых и энергетических критериев разрушения бетонов. Уточняются показатели ряда свойств легких бетонов.

*Ключевые слова: легкий конструкционный бетон; керамзитобетон; структурообразование; деформативные и прочностные характеристики*

## DEFORMATION OF A LIGHT STRUCTURAL CONCRETE STRUCTURE AT UNIAXIAL COMPRESSION

N.I. Makridin, I.N. Maksimova

The mortar component of light structural concrete has been tested for deformability and strength. The stress-strain state of the concrete structure is studied on the models. The influence of age and long-term loading conditions on the deformability and strength of expanded clay concrete is investigated. The changes in the structural and strength characteristics of expanded clay concrete under cyclic exposure to elevated temperatures are studied. The issues of forming the structure of porous aggregates and light concretes for various purposes are considered, including the definition of strength and energy criteria of concrete destruction, and the indicators of a number of properties of light concretes are specified.

*Keywords: lightweight structural concrete; expanded clay concrete; structure formation; deformative and strength characteristics*

Развитие мирового строительного производства неразрывно связано с нарастающей тенденцией применения строительных материалов и конструкций, обеспечивающих значительное снижение массы зданий и сооружений. Одно из ведущих мест здесь принадлежит легким бетонам, которые, в свою очередь, могут успешно применяться только при наличии достаточно развитой и совершенной сырьевой базы, включая пористые заполнители.

Традиционным пористым заполнителем для России является керамзитовый гравий. Несмотря на существенное уменьшение выпуска, он продолжает занимать в нашей стране

ведущее место среди пористых заполнителей. Керамзитовый гравий с разными характеристиками находит применение в строительном производстве. Например, более тяжелый и прочный заполнитель может использоваться для изготовления конструкционных бетонов, легкий – для теплоизоляции и теплоизоляционных бетонов. Отмечены выдающиеся достижения мировой науки в области технологии строительства. Например, конструкции и пролётов, и опор мостов для фьордов Норвегии в последние десятилетия выполняют преимущественно из высокопрочного конструкционного легкого бетона на пористых заполнителях, в частности керамзитовом гравии, взамен равнопрочного тяжелого бетона на плотных заполнителях из местных скальных пород (гранит, доломит и др.) [1, 2], что обусловлено существенно более высокими показателями долговечности конструкционного лёгкого бетона (морозостойкости, водонепроницаемости и соответственно сопротивления проницаемости ионов хлора и магниезиальных солей морской среды в поровую структуру бетона).

На основе экспериментальных данных, полученных отечественными и зарубежными исследователями, в работе [3] отмечено, что на пористых заполнителях с различной плотностью могут быть получены одинаковые прочностные свойства легкого бетона с резко отличающимися модулями упругости. Эти данные позволяют утверждать, что модуль упругости легкого бетона в значительной мере зависит от деформативности пористого заполнителя.

Исходя из этого, можно предположить, что дальнейшее всестороннее изучение физико-механических свойств отдельных зерен крупных пористых заполнителей позволит разработать более четкие физические представления о процессах деформирования и разрушения легкого бетона под нагрузкой и на этой основе решить ряд практических задач.

Основная цель выполненной авторами работы – расширить ранее сформулированные взгляды на закономерности прочностных и деформативных свойств заполнителей, исходя из особенностей их строения и степени пористости и интерпретируя на этой основе диаграмму сжатия керамзитобетона и процесс его ползучести.

Первая часть исследования посвящена определению деформативности и прочности растворной составляющей легкого конструкционного бетона при одноосном сжатии. В исследовании были использованы вольский и сурский речные и константиновский карьерный пески. Основные свойства песков приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

## Характеристика кварцевых песков

Кварцевый песок	$\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup>	$M_{кр}$	Полные остатки на ситах, %					
			Размеры отверстий, мм					
			2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	< 0,14
Сурский	1540	1,45	0,8	1,8	8,5	35,5	95,0	100
Константиновский	1480	1,67	0,5	0,7	4,7	61,7	96,7	100
Вольский	1550	2,7	0	6,0	66,5	97,5	100	–

Дисперсность песков (по величине удельной поверхности) составляла: сурского – 10,86; константиновского – 8,72 и вольского – 5,67 м<sup>2</sup>/кг. Форма и рельеф поверхности песков характеризовались следующим образом: вольский и сурский пески имели окатанную, гладкую поверхность и практически шарообразную форму, константиновский песок характеризовался менее окатанной формой, а поверхность его имела определенную микрошероховатость. Количество пылевидных и глинистых частиц составляло 2,0 и 7,9 % соответственно в сурском и константиновском песках.

В качестве вяжущего применяли себряковский портландцемент активностью 41,5 МПа.

Было изготовлено и испытано четыре группы образцов размером 4×4×16 см: три – из песчаного бетона на трех разновидностях песка и одна – из цементного камня. Составы смесей опытных образцов приведены в табл. 2.

Составы цементно-песчаных растворов

Группа образцов	Вид песка	Серия образцов	В/Ц	Водопотребность песка по массе, $V_{п}$ , %	Соотношение Ц : П по массе
I	нет нет	ЦК-1	0,25	–	1:0
		ЦК-2	0,31	–	1:0
II	вольский	ЦРВ-1	0,263	1,3	1:1
		ЦРВ-1,5	0,31	4,0	1:1,5
		ЦРВ-2	0,36	5,5	1:2
		ЦРВ-3	0,47	7,3	1:3
III	сурский	ЦРС-1	0,31	6,0	1:1
		ЦРС-1,5	0,365	7,7	1:1,5
		ЦРС-2	0,435	9,2	1:2
		ЦРС-3	0,575	10,8	1:3
IV	константиновский	ЦРК-1	0,315	6,5	1:1
		ЦРК-1,5	0,37	8,0	1:1,5
		ЦРК-2	0,442	9,6	1:2
		ЦРК-3	0,59	11,3	1:3

Основные характеристики структуры образцов приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Характеристики структуры образцов цементно-песчаных растворов

Серия образцов	Объемное содержание песка, %	Толщина цементного теста $\delta_{цт}$ , мкм	Расстояние между зернами песка $d$ , мкм	Коэффициент раздвижки зерен песка $\alpha_{тп}$
ЦК-1	–	–	–	–
ЦК-2	–	–	–	–
ЦРВ-1	39,5	58,4	116,8	2,27
ЦРВ-1,5	49,7	29,0	58,0	1,68
ЦРВ-2	53,0	14,6	29,2	1,34
ЦРВ-3	59,0	1,6	3,2	1,05
ЦРС-1	37,6	35,0	70,0	2,29
ЦРС-1,5	45,4	19,0	38,0	1,66
ЦРС-2	50,2	11,3	22,6	1,37
ЦРС-3	56,0	4,3	8,6	1,09
ЦРК-1	37,4	44,0	88,0	2,12
ЦРК-1,5	45,2	24,0	48,0	1,54
ЦРК-2	50,0	15,0	30,0	1,27
ЦРК-3	55,6	5,6	11,2	1,01

Толщину цементного теста ( $\delta_{цт}$ ) на развернутой поверхности дисперсной фазы рассчитывали по формуле

$$\delta_{цт} = (V - П) / S, \text{ м}, \quad (1)$$

где  $V$  – объём матричного материала,  $\text{м}^3$ ;  $П$  – объём пустот уплотненного заполнителя (наполнителя),  $\text{м}^3$ ;  $S$  – площадь поверхности заполнителя,  $\text{м}^2$ .

Расстояние между соседними зернами дисперсной фазы ( $d$ ) определяли как удвоенную толщину  $\delta_{цт}$ . Коэффициент раздвижки зерен песка ( $\alpha_{тп}$ ) находили из отношения объема заполняющего материала к объему пустот в заполняемом сыпучем материале по формуле

$$\alpha_{тп} = V_{цт} / V_{п}, \quad (2)$$

где  $V_{цт}$  – объём цементного теста,  $\text{м}^3$ ;  $V_{п}$  – объём межзерновых пустот дисперсной фазы,  $\text{м}^3$ .

Смеси всех серий образцов, за исключением серии ЦК-2, характеризовались нормальной густотой и распылом конуса на встряхивающем столике в пределах 168–172 мм. При одинаковой удобоукладываемости цементных композиций их В/Ц были существенно различными.

После суточного хранения в формах над водой образцы распалубливали и помещали на 27 суток в ванну с водой при температуре воды 20–22 °С. Затем образцы в течение 30 суток хранили в естественных лабораторных условиях (температура (20±2) °С, влажность воздуха (60±2) %).

Испытание образцов проводили в возрасте 59–60 суток. При этом прочностные и структурные характеристики растворов определяли как при одноосном кратковременном статическом сжатии, так и при неравновесных механических испытаниях. На основании обработки тензометрических измерений находили значения коэффициентов поперечной деформации  $\nu$  и  $\Delta\nu$ , объемных относительных изменений  $\theta$  и  $\Delta\theta$ , а по ним – уровни расположения параметрических точек  $R_T^o$  и  $R_T^v$  (по О.Я. Бергу).

Важнейшие прочностные, деформативные и структурные характеристики образцов, полученные в результате обработки экспериментальных данных по известной методике, приведены в табл. 4 и 5.

Т а б л и ц а 4

Прочностные и деформативные свойства раствора при сжатии

Серия образцов	Призменная прочность $R_{пр}$ , МПа	Модуль упругости при сжатии $E \times 10^{-3}$ , МПа	Сжимаемость при уровне $0,95R_{пр}$ , мм/м	Поперечная растяжимость при уровне $0,95R_{пр}$ , мм/м	Уровень расположения точки $R_T^v$
ЦК-1	129,0	24,4	5,82	1,51	не обнаруживается
ЦК-2	105,0	21,3	6,24	1,84	
ЦРВ-1	94,4	35,2	3,24	1,14	0,92
ЦРВ-1,5	75,0	33,9	3,03	0,83	0,89
ЦРВ-2	65,1	32,0	2,26	0,90	0,77
ЦРВ-3	26,2	23,8	1,45	0,36	0,73
ЦРС-1	91,2	33,7	3,67	0,73	0,96
ЦРС-1,5	78,8	33,2	3,53	0,87	0,93
ЦРС-2	63,2	28,6	3,15	0,90	0,90
ЦРС-3	31,7	20,0	2,33	0,74	0,78
ЦРК-1	88,5	28,5	4,54	0,93	0,96
ЦРК-1,5	74,8	25,5	4,44	1,08	0,93
ЦРК-2	57,4	23,9	3,29	0,90	0,91
ЦРК-3	29,4	17,2	2,56	0,66	0,87

Т а б л и ц а 5

Прочностные и деформативные свойства растворов при растяжении

Серия образцов	Прочность на растяжение при изгибе $R_{ри}$ , МПа	Модуль деформации на растяжение при изгибе $E \times 10^{-3}$ при $0,95R_{ри}$ , МПа	Растяжимость растянутой зоны $\epsilon$ при $0,95R_{ри}$ , мм/м
1	2	3	4
ЦК-1	3,16	16,7	0,17
ЦК-2	3,1	9,4	0,25
ЦРВ-1	7,94	34,2	0,21
ЦРВ-1,5	8,21	46,7	0,17
ЦРВ-2	7,64	38,4	0,20
ЦРВ-3	6,36	26,8	0,22

1	2	3	4
ЦРС-1	9,11	34,9	0,24
ЦРС-1,5	9,21	33,7	0,26
ЦРС-2	8,63	31,2	0,27
ЦРС-3	5,89	26,6	0,20
ЦРК-1	9,95	46,2	0,21
ЦРК-1,5	9,68	41,0	0,23
ЦРК-2	9,56	34,7	0,27
ЦРК-3	6,03	19,9	0,29

Анализ данных (см. табл. 2–5) позволяет сделать следующие выводы.

По мере увеличения содержания песка в составе цементного раствора толщина цементного теста между соседними частицами дисперсной фазы уменьшается, что вызывает повышение неоднородности материала, следствием чего является увеличение интенсивности трещинообразования в структуре материала при его одноосном нагружении.

Изменение структуры материала за счет как В/Ц-отношения для цементного камня, так и соотношения Ц : П для цементного раствора, при постоянной удобоукладываемости приводит к значительным изменениям контролируемых свойств цементного раствора. Так, изменение В/Ц-отношения цементного теста от значения 0,25 (нормальная плотность теста) до 0,31 приводит, с одной стороны, к уменьшению призмочной прочности и модуля упругости соответственно на 22,8 и 12,7 %, а с другой – к увеличению сжимаемости цементного камня на 9,2 %.

При переходе от однокомпонентной структуры цементного камня к двухкомпонентной, например к цементному раствору различного состава и разной структуры, прочностные, деформативные и структурные свойства композитов претерпевают существенные и принципиальные изменения.

Увеличение содержания песка в композитных составах всех серий образцов вызывает снижение значений призмочной прочности, модуля упругости, сжимаемости, поперечной растяжимости и уровня расположения параметрической точки  $R_T^V$ , характеризующей уровень прогрессирующего развития микротрещинообразования, а также принципиально изменяет характер разрушения образцов при осевом сжатии.

Модули деформаций по растянутой и сжатой зонам при уровне нагружения  $0,95R_{пр}$  оказались практически равными для всех растворов. опыты показали, что модули упругости при изгибе примерно в два раза превышают значения модулей деформации при уровне нагружения  $0,95R_{пр}$ .

Значения модуля упругости цементных композитов на каждом виде песка однозначно определяются его призмочной прочностью, чего нельзя сказать о значениях уровней расположения границ параметрической точки  $R_T^V$ . На величину абсолютных значений рассматриваемых механических параметров вид песка оказывает значительное влияние.

Характер разрушения образцов при осевом сжатии по мере увеличения доли песка становится все более пластичным, несмотря на то что при этом предельная сжимаемость и поперечная растяжимость материала уменьшаются.

Микроскопический анализ поверхностей разрушения образцов при изгибе показал, что адгезионное сцепление между кварцевым песком и цементным камнем отсутствует. На поверхности разрушения четко просматриваются лунки из-под песчинок, а характер поверхности лунок гладкий, лощеный. Превышение прочности при изгибе цементных композитов на сурском и константиновском песках обусловлено тем, что эти пески имеют менее окатанную форму по сравнению со стандартным вольским песком.

Для исследования напряженно-деформированного состояния структуры бетона на моделях модель бетона была принята в виде растворной матрицы с утопленными пластинами – включениями различной формы и разными модулями упругости. Сравнивали следующие модели:  $E_b = E_m$ ;  $E_b > E_m$  и  $E_b < E_m$ , где  $E_b$  и  $E_m$  – соответственно модули упругости включений и матрицы. Все модели имели одинаковые геометрические размеры – плоские прямоугольные пластинки размером  $100 \times 50 \times 15$  мм.

Было изготовлено пять серий образцов моделей бетона, различавшихся видом и объемным содержанием включений. Матричная основа всех моделей была одинаковой и состояла из цементно-песчаного раствора состава 1:1 по массе; водоцементное отношение было равно 0,4. Использовали портландцемент Вольского завода марки 400 и сурский речной песок с модулем крупности 1,57. Для оценки механических свойств матричной основы моделей из одного замеса цементно-песчаного раствора (матричного материала) одновременно изготавливали как модели бетона, так и образцы тех же размеров ( $100 \times 50 \times 15$  мм). В качестве включений были приняты: металлические диски диаметром 20 мм и толщиной 15 мм; металлические диски, обернутые калькой для предотвращения сцепления с цементным раствором; керамзитовый гравий с различной формой и поверхностью. Кроме того, была испытана модель с пустотами диаметром 20 мм.

После формования образцы твердели в течение 28 суток в нормальных условиях в эксикаторе над водой, затем их подвергали механическим испытаниям. Предварительно на плоскостях двух противоположных сторон каждой модели наклеивали крестом от десяти до девятнадцати тензодатчиков с базой 5 и 10 мм для замера продольных и поперечных деформаций. Сжимающая нагрузка передавалась на короткие торцевые поверхности образцов. Нагружение осуществляли ступенями в 0,1 ожидаемой прочности на сжатие вплоть до разрушения. На каждой ступени нагружения давали пятиминутную выдержку с целью снятия показаний тензодатчиков сопротивления с помощью измерителя деформаций АИД-1м.

Анализ напряженно-деформированного состояния модели бетона с тремя пустотами показал, что наиболее опасными зонами по концентрации напряжений растяжения являются переемы между пустотами. Уже при интенсивности напряжения  $0,23R_{сж}$  растяжение в перемычке составляло 4,2 мм/м. Модуль упругости матричного материала этой модели составил  $21,8 \cdot 10^3$  МПа, следовательно, напряжения растяжения в перемычке равнялись 91,5 МПа, что в 19,5 раза превысило среднее напряжение сжатия в модели. В целом эта модель бетона показала относительно матричного материала снижение прочности на осевое сжатие с 62,5 до 20,5 МПа и уменьшение предельной сжимаемости с 4,18 до 1,43 мм/м.

Существенно отличается напряженно-деформированное состояние модели бетона с тремя металлическими бобышками. Эта модель бетона имела прочность при сжатии, примерно равную прочности матрицы, – 57,9 и 58,9 МПа соответственно. Предельная сжимаемость модели оказалась меньше предельной сжимаемости матрицы – 3,02 и 3,54 мм/м соответственно. Существенная разница между  $E_b$  и  $E_m$ , а также хорошее сцепление включений с матрицей приводили к увеличению деформаций сжатия в перемычках примерно в 1,8 раза и к увеличению деформаций растяжения в этих зонах – примерно в 12 раз.

Разрушение модели начиналось с зарождения и развития макротрещины в перемычке между металлическими дисками.

Ликвидация адгезии с помощью кальки между составляющими модели усугубила напряженное состояние в перемычках. Уже при уровне напряжения  $0,29R_{сж}$  в этих зонах деформации растяжения составляли соответственно 1,86 и 1,63 мм/м. При дальнейшем нагружении тензодатчики фиксировали резкое увеличение деформаций, которое заканчивалось раскрытием трещин и разрушением образцов.

Исключение адгезии между металлическими бобышками и матрицей приводило к снижению прочности модели на сжатие относительно матричного материала с 47,4 до 18,0 МПа, а также к уменьшению деформаций сжатия с 3,63 до 1,7 мм/м.

Несколько слов о моделях бетона, в которых в качестве включений использовали зёрна керамзита. У зёрен предварительно определяли прочностные и деформативные характеристики. Всего было использовано три вида керамзита, модуль упругости которых составлял соответственно  $13,57 \times 10^3$ ,  $20,28 \times 10^3$  и  $25,12 \times 10^3$  МПа. Матрицы этих моделей были одинаковыми и имели модуль упругости  $21,9 \times 10^3$  МПа. Таким образом, было испытано три варианта моделей керамзитобетона, различающихся соотношением  $E_B$  и  $E_M$ , а именно: первый вариант  $E_B < E_M$ ; второй  $E_B = E_M$  и третий  $E_B > E_M$ .

Исследования показали, что гранула керамзита с  $E_0 = 13570$  МПа начала участвовать в перераспределении напряжений в модели бетона с напряжения 23 МПа, показала наибольшую деформацию в модели (1,78 мм/м) и при уровне напряжения 36 МПа утратила свою несущую способность. Гранула с  $E_0 = 20280$  МПа начала участвовать в распределении перенапряжений в модели бетона с напряжения 13,8 МПа, показала наименьшую деформацию в модели (1,14 мм/м), начала терять несущую способность при 36 МПа, утратив ее полностью при напряжении 40 МПа. Гранула с  $E_0 = 25120$  МПа, т.е. с самым большим значением модуля упругости (большим, чем у матрицы), начала участвовать в перераспределении напряжений в модели бетона с уровня напряжений в 8,8 МПа и свою несущую способность начала терять с уровня напряжения 40 МПа.

Анализ напряженно-деформированного состояния показал, что поле деформаций керамзитобетонной модели на всех уровнях нагружения было более однородным, чем в моделях, рассмотренных ранее, что связано с перераспределением деформаций в структурной модели на этапах нагружения. Независимо от деформационных свойств зерен керамзита они вплоть до разрушения оказывают непосредственное влияние на поле напряжений (деформаций) матричной составляющей модели и способствуют повышению однородности деформационного поля модели бетона.

Было исследовано влияние возраста и условий длительного нагружения на деформативность и прочность керамзитобетона [5, 6]. Исследования проводили на керамзитобетоне марки 300, приготовленном на основе никольского керамзита. Состав бетона был следующим: цемент – 450 кг, керамзит фракции 5–20 мм марки 700 – 530 кг, кварцевый речной песок ( $M_{кр}=1,7$ ) – 650 кг и вода – 170 л. После суточной выдержки в нормальных условиях образцы-кубики и призмы пропаривали по режиму 12+2+8 часов при максимальной температуре 80–85 °С. После остывания их помещали в эксикатор, где хранили 28 суток.

В возрасте 28 суток часть образцов была подвергнута механическому испытанию. Кубиковая прочность оказалась равной в среднем 31,5 МПа при плотности керамзитобетона  $1750 \text{ кг/м}^3$ . Призменная прочность в среднем составляла 27,8 МПа. Отношение призменной прочности  $R_{пр}$  к кубиковой  $R_k$  оказалось равным 0,85. Начальный модуль упругости составил 17200 МПа.

Далее оставшиеся образцы были разделены на две группы. Образцы первой группы подвергали длительному испытанию в обычных температурно-влажностных условиях окружающей среды, образцы второй группы – в условиях непосредственного контакта образцов с водой. В свою очередь, образцы каждой группы были разделены на две подгруппы: контрольную и рабочую.

Рабочие образцы-призмы в возрасте бетона 38–40 суток загружали длительной нагрузкой осевого сжатия с помощью пружинных установок с использованием гидродомкрата. Величины обжатия бетона рабочих образцов обеих групп были приняты в 12 и 18 МПа, т.е. было принято два уровня длительного нагружения  $0,4$  и  $0,6R_{пр}$ . Фактическая же степень обжатия призм уточнялась на разгруженных образцах после испытания их на длительное действие нагрузки (табл. 6). Испытание призм на ползучесть в естественных условиях и при постоянном контакте с водой проводили на неизолированных образцах. Для изучения влияния воды на свойства длительно нагруженного керамзитобетона образцы-призмы непосредственно в пружинных установках

помещали в специальные металлические емкости, в которые заливали воду на высоту 30 см. Исследуемая часть призмы по замеру деформаций ползучести (на базе 200 мм) находилась полностью в жидкости. Через каждые 30–35 суток воду заменяли свежей.

Т а б л и ц а 6

Влияние условий твердения на деформативные и прочностные свойства  
керамзитобетона

Шифр образцов	$R_{np}$ , МПа	$\sigma / R_{np}$	$E_0$ перед загрузением, МПа	$E_0$ после разгрузки, МПа	$\varepsilon_y \times 10^5$	$\varepsilon_n \times 10^5$	$\varepsilon_{o.y.} \times 10^5$	$\varepsilon_{o.n.} \times 10^5$
Естественные условия								
1-11	37,0	0,32	16500	12200	72	83	82	12
2-12	32,9	0,38	15700	12000	74	90	104	17
3-13	33,0	0,55	18700	10900	99	167	153	13
4-10	31,6	0,58	18700	10000	119	169	143	–
5-14	29,5	0,62	20000	10200	105	160	150	16
6-9	28,0	0,64	19300	11900	98	136	132	–
Водная среда								
1-1	27,0	0,43	17900	22000	66	36	62	19
2-3	30,0	0,52	15300	15500	98	37	87	18,5
3-4	30,0	0,64	15300	15700	116	72	102	37

Примечание:  $\varepsilon_y$  – упругомгновенные деформации в момент загрузки образцов на длительное обжатие;  $\varepsilon_n$  – конечные значения деформации ползучести;  $\varepsilon_{o.y.}$  – обратимые упругомгновенные деформации;  $\varepsilon_{o.n.}$  – обратимые деформации ползучести.

Контрольные образцы-кубы и призмы находились в условиях окружающей среды, аналогичных условиям рабочих образцов, но не в нагруженном состоянии.

Деформации ползучести рабочих образцов измеряли стационарно установленными на призмах индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм на базе 200 мм. Наблюдения за образцами осуществляли постоянно до полной стабилизации ползучести (600 суток). После этого образцы-призмы разгружали, измеряли обратимые упругомгновенные деформации последствия  $\varepsilon_{o.y.}$  и определяли массу образцов. Затем рабочие образцы наблюдали еще 30 суток в тех же условиях окружающей среды с целью определения обратимой деформации ползучести  $\varepsilon_{o.n.}$  до ее стабилизации. После чего и контрольные, и рабочие образцы были подвергнуты механическому испытанию с целью определения прочностных и деформативных характеристик бетонов при кратковременном нагружении (табл. 7) в соответствии с методическими рекомендациями ГОСТ 18105–2018 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности».

Т а б л и ц а 7

## Характеристики ползучести керамзитобетона

Шифр образцов	$\mu_y$	$\varepsilon_1 \times 10^5$	$\Phi_{(t \rightarrow \infty)}$	$\xi$	$\nu_y$	$C \times 10^4$ , МПа <sup>-1</sup>
1	2	3	4	5	6	7
Естественные условия						
1-11	330	250	1,15	0,54	0,46	0,7
2-12	365	224	1,22	0,55	0,45	0,72
3-13	330	237	1,69	0,63	0,37	0,92
4-10	316	219	1,42	0,59	0,41	0,92
5-14	346	218	1,52	0,6	0,4	0,87
6-9	425	194	1,39	0,58	0,42	0,76



1	2	3	4	5	6	7
Водная среда						
1-1	815	130	0,54	0,35	0,65	0,3
2-3	510	166	0,38	0,27	0,73	0,24
3-4	543	180	0,62	0,38	0,62	0,38

П р и м е ч а н и е :  $\mu_y = E_0 / R_{пр}$  – упругая характеристика;  $\varepsilon_1$  – предельная сжимаемость при уровне обжатия  $0,9R_{пр}$ ;  $\varphi_{(t \rightarrow \infty)} = \varepsilon_n / \varepsilon_y$  – величина ползучести;  $\xi = \varepsilon_n / \varepsilon_8$  – коэффициент ползучести;  $\nu_y = \varepsilon_y / \varepsilon_8$  – коэффициент упругости;  $C = \varepsilon_n / \sigma$  – мера ползучести;  $\varepsilon_8 = \varepsilon_n + \varepsilon_y$  – полные деформации бетона;  $\sigma$  – напряжение обжатия бетона при загрузке образцов.

Наблюдение за массой образцов в течение 30 суток после их разгрузки показало, что масса образцов не изменялась, т.е. деформации последствия не сопровождались водопоглощением и деформациями набухания призм.

Результаты исследований деформационных и прочностных характеристик керамзитобетона (см. табл. 6 и 7) показали:

а) по результатам испытания контрольных образцов, находившихся в естественных условиях в течение 658 суток, – средняя кубиковая прочность бетона уменьшилась на 5 %; призмная прочность бетона примерно настолько же процентов возросла; начальный модуль упругости бетона снизился на 20 %; влажность бетона уменьшилась с 5,1 до 3,7 %; предельная деформативность бетона при уровне обжатия  $0,9R_{пр}$  в возрасте 658 суток составила 1,91 мм/м;

б) по результатам испытания контрольных образцов, находившихся в воде в течение 658 суток, – и кубиковая, и призмная прочность бетона практически не изменились, модуль упругости бетона увеличился примерно на 19 %, водопоглощение возросло с 5,1 до 9,6 %; предельная деформативность бетона при уровне обжатия  $0,9R_{пр}$  составила 1,35 мм/м.

Анализ данных табл. 6 показал, что обжатие керамзитобетона в естественных условиях приводило к значительному повышению призмной прочности при низких уровнях обжатия, которая осталась практически неизменной при уровне обжатия в пределах  $0,62 - 0,64R_{пр}$ . Модуль же упругости рабочих образцов в естественных условиях после разгрузки при всех уровнях обжатия показал снижение численных значений в пределах от 24 до 49 %. При этом большее снижение модуля соответствует более высокому уровню обжатия бетона.

Длительное обжатие бетона в условиях водной среды с последующей разгрузкой образцов практически не приводило к изменению призмной прочности и модуля упругости керамзитобетона. Сравнение приведенных данных с результатами других исследователей показывает, что степень обратимости мгновенных деформаций у керамзитобетона намного выше, чем у тяжелого бетона и цементного раствора. Повышенная обратимость деформаций керамзитобетона обусловлена особенностями упругопластических свойств керамзита.

Анализ данных табл. 7 показал, что длительное обжатие и последующая разгрузка образцов в обеих средах приводят к повышению предельной сжимаемости керамзитобетона относительно контрольных образцов. Как мера ползучести, так и величина ползучести керамзитобетона зависят от окружающей среды, а численные значения этих величин возрастают с ростом интенсивности напряжений обжатия. Коэффициент упругости у керамзитобетона больше, чем у тяжелых бетонов тех же марок.

Таким образом, керамзитовый гравий в бетоне до уровня напряжений  $0,5R_{пр}$  может работать упруго без нарушений структуры. Повышение его концентрации приводит к увеличению упругости бетона. Для улучшения качества керамзитобетона в

этом направлении целесообразно повышать не только прочность заполнителя, но и степень насыщения бетона керамзитом.

В заключение данного цикла исследований было изучено изменение структурных и прочностных характеристик керамзитобетона при циклическом воздействии повышенных температур. В исследованиях использовали следующие материалы: портландцемент Вольского завода «Большевик» активностью 40 МПа, сурский речной песок с модулем крупности 1,7, керамзитовый гравий Пензенского завода КПД фракции 5–20 мм с прочностью в цилиндре 2,2 МПа и насыпной плотностью 690 кг/м<sup>3</sup>.

На этих материалах были подобраны составы бетонов марок 250 и 300. Состав бетонной смеси по массе (цемент : песок : керамзит : вода) для бетона марки 250 был 437 : 819 : 520 : 229 и для бетона марки 300 – 620 : 539 : 520 : 258. Коэффициент насыщения керамзитом составлял 0,44. Подвижность бетонной смеси в обоих составах 10–15 с.

Опытные образцы (кубы размером 10×10×10 см и призмы 10×10×40 см) формовали на лабораторной виброплощадке со стандартными параметрами вибрации с пригрузом 0,005 МПа. После термовлажностной обработки образцы хранили в нормальных условиях. В возрасте 28 суток определили прочностные, деформативные и структурные характеристики бетонов обеих марок. Затем образцы разделили на контрольные и рабочие. Контрольные образцы хранили в нормальных условиях, а рабочие – подвергали ежесуточному воздействию повышенных температур (8–9 часов нагревания при 65–70 °С) с последующим остыванием в сушильном шкафу. Интенсивность подъема температуры в шкафу – 60 °С/ч. Всего было осуществлено 480 циклов теплосмен. В контрольные сроки (28 и 745 суток) на каждом составе бетона испытывали по шесть призм и 10 кубов. Осредненные результаты исследований приведены в табл. 8.

Т а б л и ц а 8

Влияние тепловых воздействий на свойства керамзитобетона

Физико-механические характеристики керамзитобетона	Бетон марки 250			Бетон марки 300		
	Контрольные образцы		Рабочие образцы	Контрольные образцы		Рабочие образцы
	Возраст образцов, сут			Возраст образцов, сут		
	28	745	745	28	745	745
1	2	3	4	5	6	7
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1845	1810	1740	1830	1780	1745
Влажность по массе, %	–	3,2	1,1	–	4,1	0,8
Прочность при сжатии, МПа	25	25,3	24,6	29,4	27,1	28,8
Коэффициент термостойкости по кубиковой прочности	–	1	0,97	–	1	1,06
Прочность на растяжение при раскалывании, МПа	1,95	2,19	2,15	1,95	2,15	2,42
Коэффициент термостойкости по прочности на раскалывание	–	1	0,98	–	1	1,12
Призменная прочность, МПа	21	21,2	24,2	24,8	27	22,2
Начальный модуль упругости, МПа	17110	14720	11410	15390	11930	7430
Коэффициент Пуассона	0,18	0,27	0,28	0,23	0,27	0,23
Коэффициент Пуассона по остаточным деформациям	–	0,87	1,29	–	1,4	1,8
Уровень параметрической точки $R_T^v$	0,82	0,75	0,67	0,92	0,7	0,67
Скорость ультразвукового импульса, м/с	–	2958	2551	–	2960	2569

1	2	3	4	5	6	7
Удельная работа разрушения ( $1/2 R_{пр} \times \varepsilon_{сж}$ ), Дж/м <sup>3</sup>	17220	18020	28314	23560	32132	28860
Удельная работа разрушения на 1 кг цемента	39,4	41,2	64,8	34,6	47,2	42,4

Стойкость керамзитобетона к циклическому воздействию положительных температур оценивали по коэффициенту термостойкости (отношение прочности рабочего образца к прочности контрольного), по изменению прочностных, деформационных и структурных характеристик, а также по удельной работе разрушения образцов с применением тензометрического и ультразвукового методов исследования.

Из табл. 8 видно, что коэффициент термостойкости по кубиковой прочности и по прочности на растяжение для керамзитобетона марки 250 практически равен единице, а для бетона марки 300 оказался даже больше единицы.

Увеличение возраста и циклическое воздействие теплосмен привели к уменьшению абсолютных значений модуля деформаций керамзитобетона обеих марок. Увеличился разброс абсолютных значений модуля сравниваемых образцов на уровне обжигания  $0,2 - 0,3R_{пр}$ .

В ы в о д ы :

1. Значения модуля упругости цементных композитов на каждом виде песка однозначно определяются его призменной прочностью, чего нельзя сказать о значениях уровней расположения границ параметрической точки  $R_T^v$ . На величину абсолютных значений рассматриваемых механических параметров вид песка оказывает значительное влияние.

Характер разрушения образцов при осевом сжатии по мере увеличения доли песка становится все более пластичным, несмотря на то, что при этом предельная сжимаемость и поперечная растяжимость материала уменьшаются.

2. Анализ напряженно-деформированного состояния модели бетона с тремя пустотами показал, что наиболее опасными зонами по концентрации напряжений растяжения являются перемычки между пустотами. Существенно отличается напряженно-деформированное состояние модели бетона с тремя металлическими бобышками. Разрушение модели начиналось с зарождения и развития макротрещины в перемычке между металлическими дисками.

Анализ напряженно-деформированного состояния керамзитобетонной модели показал, что поле деформаций на всех уровнях нагружения было более однородным, чем в моделях с пустотами и металлическими бобышками, что, по мнению авторов, связано с перераспределением деформаций в структурной модели на этапах нагружения. Независимо от деформационных свойств зерен керамзита они вплоть до разрушения оказывают непосредственное влияние на поле напряжений (деформаций) матричной составляющей модели и способствуют повышению однородности деформационного поля модели бетона.

3. Длительное обжигание бетона в условиях водной среды с последующей разгрузкой образцов практически не приводит к изменению призменной прочности и модуля упругости керамзитобетона.

Степень обратимости мгновенных деформаций у керамзитобетона намного выше, чем у тяжелого бетона и цементного раствора. Повышенная обратимость деформаций керамзитобетона обусловлена особенностями упругопластических свойств керамзита.

4. Негативное изменение упругих характеристик керамзитобетона при циклическом воздействии теплосмен, обусловленное возникновением трещин на микроуровне, имеет и позитивное значение. Возникающие микротрещины обеспечивают большую пластичность керамзитобетона на указанном уровне, что является важнейшим

условием создания надежной конструкции для восприятия ударного и внезапного действия нагрузки или сейсмических воздействий.

### Список литературы

1. Ярмаковский, В.Н. Мосты между наукой и практикой строительства / В.Н. Ярмаковский // Строительные материалы. – 2021. – № 3. – С. 18–35.
2. Ярмаковский, В.Н. Физико-химические и структурно-технологические основы получения высокопрочных и высокодолговечных конструкционных легких бетонов / В.Н. Ярмаковский // Строительные материалы. – 2016. – № 6. – С. 6–11.
3. Каприелов, С.С. Самоуплотняющийся высокопрочный керамзитобетон классов В50-В65 – новое поколение легких бетонов для конструкций высотных зданий / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Н.М. Селютин // Строительные материалы. – 2023. – № 4. – С. 42–50.
4. Макридин, Н.И. Механическое поведение конструкционного керамзитобетона при осевом сжатии / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова // Строительные материалы. – 2009. – № 1. – С. 51–53.
5. Макридин, Н.И. Структура и свойства керамзитового гравия для бетонов повышенной прочности / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, М.В. Симаков // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 3 (14). – С. 52–56.

### References

1. Yarmakovsky, V.N. Bridges between science and construction practice / V.N. Yarmakovsky // Building materials. – 2021. – No. 3. – P. 18–35.
2. Yarmakovsky, V.N. Physico-chemical and structural-technological foundations of obtaining high-strength and long-lasting structural lightweight concretes / V.N. Yarmakovsky // Building Materials. – 2016. – No. 6. – P. 6–11.
3. Kapriellov, S.S. Self-sealing high-strength expanded clay concrete of classes B50-B65 is a new generation of lightweight concretes for high-rise buildings / S.S. Kapriellov, A.V. Sheinfeld, N.M. Selyutin // Building materials. – 2023. – No. 4. – P. 42–50.
4. Makridin, N.I. Mechanical behavior of structural expanded clay concrete under axial compression / N.I. Makridin, I.N. Maksimova // Building materials. – 2009. – No. 1. – P. 51–53.
5. Makridin, N.I. Structure and properties of expanded clay gravel for high-strength concrete / N.I. Makridin, I.N. Maksimova, M.V. Simakov // Regional architecture and engineering. – 2012. – No. 3 (14). – P. 52–56.

*Иркутский национальный исследовательский  
технический университет*

Россия, 664074, г. Иркутск,  
ул. Лермонтова, д. 83,  
тел. +7-(3952)-40-54-67

**Пинус Борис Израилевич,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Строительное производство»  
E-mail: pinusb@list.ru

**Корнеева Инна Геннадьевна,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Строительное производство»  
E-mail: kornee-inna@yandex.ru

*Irkutsk National Research Technical  
University*

Russia, 664074, Irkutsk, 83, Lermontov St.,  
tel: +7(3952)-40-54-67

**Pinus Boris Izrailevich,**  
Doctor of Sciences, Professor of the  
Department «Building Production»  
E-mail: pinusb@list.ru

**Korneeva Inna Gennadievna,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the Department «Building Production»  
E-mail: kornee-inna@yandex.ru

## ВРЕМЯ РАЗРУШЕНИЯ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ УСТАЛОСТНОГО ИЗНОСА ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

Б.И. Пинус, И.Г. Корнеева

Рассмотрены вопросы учета последствий усталостной деградации обычных и дисперсно-армированных (полипропиленовые фибры) бетонов при нестационарных внешних нагрузках, смоделированных циклами осевого сжатия с амплитудой  $\eta = 0,6; 0,8$  и нулевой асимметрией. Их влияние оценивалось многофакторным сопоставлением удельных параметров отклика бетонов на осевое сжатие в исходном и постциклическом состояниях. Испытания велись в режиме постоянства скорости деформирования  $0,04$  мм/с с автоматическим контролем нагрузки, деформаций, прилагаемой и поглощаемой энергии и времени разрушения призматических образцов. Установлено существенное различие кинетики и характера параметров сопротивления, что предопределяет необходимость индивидуализации их учета. Отмечено, что время разрушения является наиболее чувствительным параметром усталостной трансформации композитов при нестационарных воздействиях.

*Ключевые слова: усталость, фибробетон, бетон, нестационарные воздействия*

## FRACTURE TIME AS AN INDICATOR OF FATIGUE WEAR OF CEMENT COMPOSITES

B.I. Pinus, I.G. Korneeva

The article is devoted to the issue of accounting the effects of fatigue degradation of conventional and dispersed reinforced (polypropylene fibers) concretes under non-stationary external loads modeled by axial compression cycles with amplitude  $\eta = 0.6; 0.8$  and zero asymmetry. Their influence is estimated by a multifactorial comparison of specific parameters of concrete response to axial compression in the initial and post-cyclic states. The tests has been carried out in the mode of constant deformation rate of  $0.04$  mm/s with automatic control of load, deformations, applied and absorbed energy and fracture time of prismatic samples. A significant difference in the kinetics and nature of resistance parameters has been established, which determines the need to individualize their accounting. The failure time is the most sensitive parameter of fatigue transformation of composites under non-stationary influences.

*Keywords: fatigue, fibroconcrete, concrete, unsteady impacts*

**Введение.** В формализованном представлении нормативное обеспечение эксплуатационной пригодности железобетонных конструкций состоит в выполнении системы критериальных условий соответствия расчетных усилий и их приемлемого отклика. Причем расчетные усилия определяются неблагоприятным сочетанием максимально

ожидаемых внешних нагрузок, а возможный отказ – как случайный, параметрический (ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований»). При таком подходе фактические нестационарные колебания воздействий и инициируемые ими последствия (СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения») не учитываются.

На наш взгляд, это объясняется сложностью системной формализации взаимосвязанных процессов нагружения и отклика, обусловленных одновременным протеканием дислокационных, диффузионных, химических и механических изменений. Используемые при этом физические закономерности механики разрушения [1–4] и феноменологические модели теории накопления повреждений [5–8] объективно ограничены в прогнозировании усталостной долговечности сложных многоуровневых химически активных структур цементно-матричных композитов.

Очевидно, что для более адекватного моделирования и систематизации последствий усталостной трансформации необходима обобщенная оценка повреждаемости, одновременно учитывающая влияние силового, деформационного, энергетического и временного факторов. Кинетическая концепция прочности твердых тел [9], базирующаяся на единстве механизмов разрыва внутривязанных связей и неупругого деформирования, представляется достаточно приемлемой основой комплексного подхода к анализу усталостной деградации. При этом одним из показателей усталости может рассматриваться время  $\tau$ , затрачиваемое на разрушение образца (конструкции), с различной предысторией деформирования. Его чувствительность к постциклическим изменениям цементно-матричных композитов и сопоставительная корреляция с кинетикой других параметров внутреннего сопротивления являются основной целью настоящего исследования.

#### Методика

На циклическое и последующее монотонное сжатие испытаны стандартные призматические образцы ( $100 \times 100 \times 400$  мм), изготовленные из бетона состава Ц:П:Щ:В = 1:1,42:3,31:0,55 (серия «Б») и фибробетона аналогичного состава с 1,5%-м объемным армированием полипропиленовыми волокнами диаметром 0,8 мм и длиной 40 мм (серия «ФБ»).

Циклическим воздействиям предшествовала калибровка образцов по скорости ультразвука и массе с соблюдением принятого уровня изменчивости не более 4 %. Механическое нагружение на всех этапах осуществлялось в режиме постоянства скорости деформирования (0,04 мм/с), что обеспечивало адекватность отклика композитов прикладываемым усилиям. Используемый испытательный комплекс (машина Instron 5989) с набором экстензометров (рис. 1) позволял осуществлять испытания по заданной программе в автоматическом режиме с фиксацией параметров воздействия, энергии нагружения, поглощаемой энергии, времени поэтапной стабилизации напряжений и разрушения, площади петель гистерезиса, остаточных деформаций и других. Амплитуда  $\eta$  и асимметрия  $\rho$  циклических воздействий (ЦВ) приняты в диапазоне значений, находящихся в пределах 95 % изменчивости верхней границы микротрещинообразования композитов. При этом число циклов нагружения определялось из условия сопоставимости энергии внешних воздействий:

$$\eta = 0,6; \rho = 0; N = 200;$$

$$\eta = 0,8; \rho = 0; N = 50.$$



Рис. 1. Общий вид испытаний

**Основные результаты и их обсуждение**

Типичные формы кинетики параметров сопротивления в процессе монотонного постциклического сжатия представлены на рис. 2, а численные значения – в табл. 1. Наблюдаемые существенные различия их изменений подтверждают научные представления об усталостной деградации как многофакторном и стадийном процессе с инверсионными закономерностями и последствиями [10–13].

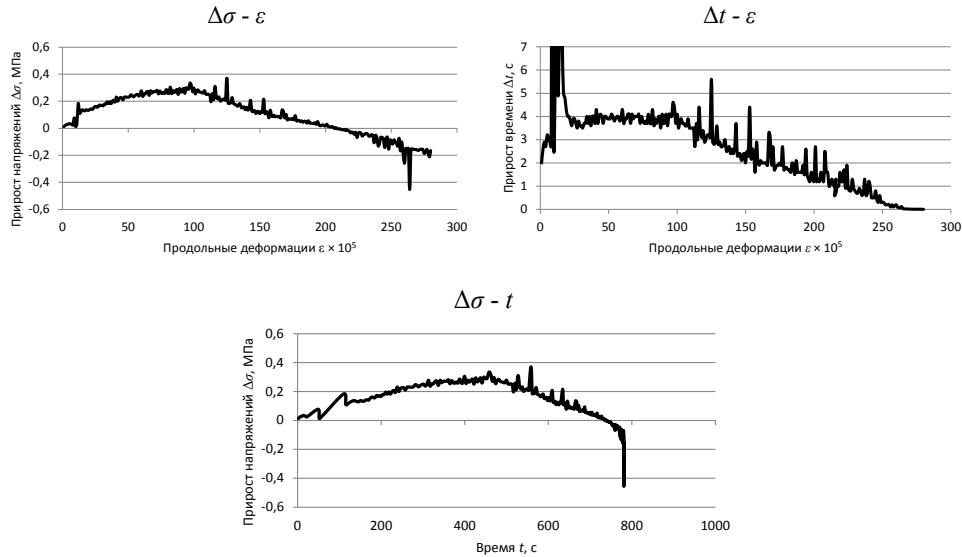


Рис. 2. Кинетика параметров сопротивления

Т а б л и ц а 1

Показатели сопротивления композитов в исходном и постциклическом состояниях

Серия	Предыстория испытаний		Прочность		Пиковые деформации		Время разрушения		Энергия разрушения	
	$\eta$	$N$	$\sigma_{max}$ , МПа	Изменение	$\epsilon \cdot 10^5$	Изменение	$t$ , с	Изменение	$W_p$	Изменение
Б	0	0	43,2	1	248	1	891	1	15337	1
	0,6	200	42,2	0,98	202	0,81	799	0,9	14047	0,91
	0,8	50	38,5	0,89	260	1,05	627	0,7	10020	0,65
ФБ	0	0	36,7	1	290	1	1048	1	15379	1
	0,6	200	35,7	0,97	228	0,79	727	0,69	11231	0,73
	0,8	50	35,1	0,96	255	0,88	660	0,63	9574	0,62

Экстремальность прироста напряжений в режиме постоянства кинетики деформаций свидетельствует об одновременном протекании конструктивных и деструктивных изменений усталостной трансформации и, как следствие, о наличии приемлемого (до критического) уровня деструкции по условиям обеспечения проектной долговечности. Его определение предлагается производить по динамике удельных изменений поэтапного прироста напряжений и времени на единицу возрастания относительной деформации образца. Такой подход позволит исключить влияние абсолютных погрешностей испытаний, обусловленных объективными факторами неоднородности, различия уровней ЦВ, неточности измерений и другие системные издержки испытаний. Кинетика удельных изменений времени и напряжений в режиме постоянства скорости деформирования представлена на рис. 3, 4. Их практическая тождественность позволяет предполагать адекватность прогнозов усталостных изменений показателей эксплуатационной пригодности конструкций по кинетике их долговечности (времени разрушения). Приемлемость такого подхода подтверждается одинаковой динамикой рассматриваемых параметров на восходящем этапе нагружения обычных и фиброусиленных

цементных матриц. Эффективность дисперсного армирования сказывается в процессе формирования магистральных трещин, реализуемого в условиях стесненного деформирования и ускоренного разрушения. Следует отметить, что практические подходы к проектному прогнозу влияния усталостных изменений на нормируемые предельные состояния (ПС) сопряжены с необходимостью систематизации случайных (по природе!) нестационарных внешних воздействий при соблюдении принципа тождественности ожидаемых последствий. Объективной критериальной основой такого обобщения могут являться удельно-цикловые изменения.

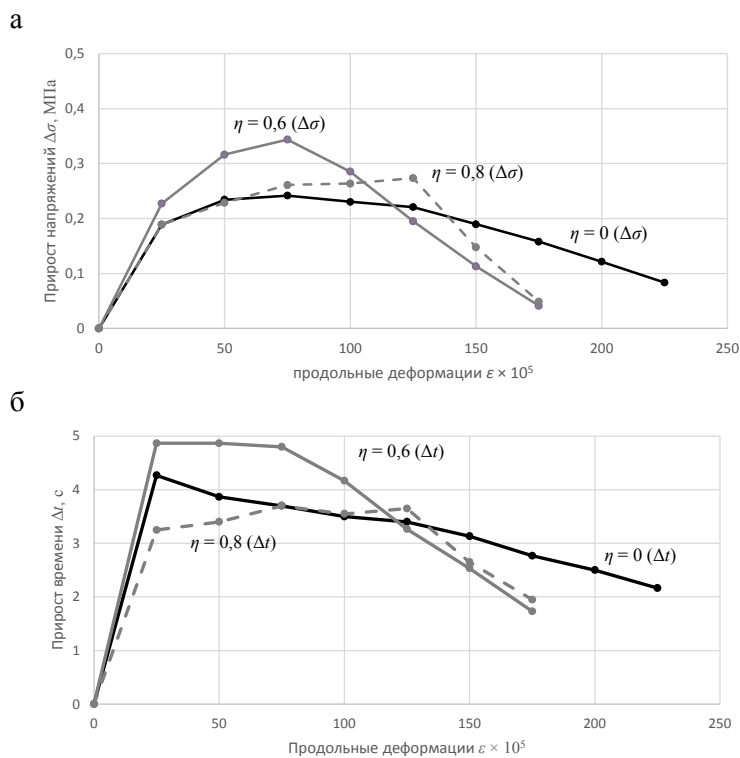


Рис. 3. Кинетика удельных изменений напряжений (а) и времени (б) обычного бетона

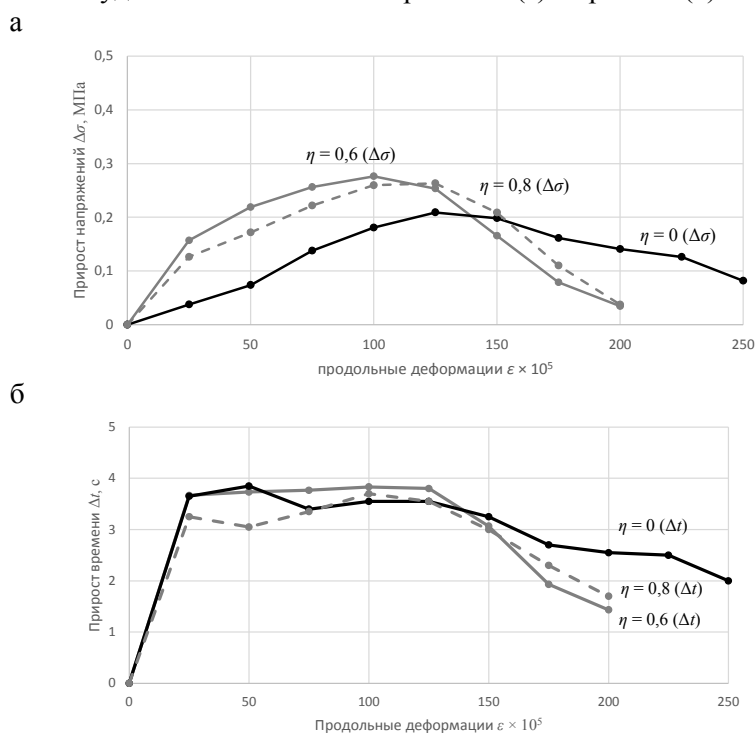


Рис. 4. Кинетика удельных изменений напряжений (а) и времени (б) фибробетона



В табл. 2 приведены сопоставительные значения удельных изменений параметров сопротивления композитов в цикле воздействий с различными амплитудами и нулевой асимметрией. Они характеризуются большим разбросом значений относительных изменений показателей внутреннего сопротивления при возрастании амплитуды цикла. Это определяет целесообразность индивидуализации критериальных условий систематизации нестационарных воздействий с учетом усталостной чувствительности параметров прочности и деформативности бетонов, входящих в функциональные нормативные модели эксплуатационной пригодности.

Т а б л и ц а 2

Удельные (за цикл) изменения контролируемых параметров (КП)

Параметр (КП)	Серия «Б»			Серия «ФБ»			Примечания
	Предыстория		Относительная динамика	Предыстория		Относительная динамика	
	0,6	0,8		0,6	0,8		
$\sigma_{\max}$	0,065	0,124	1,91	0,006	0,008	1,33	Размерность «КП» – стандартная $S$ – площадь петли гистерезиса $W_{\sigma}$ – изменения энергии поглощаемой образцом
$\varepsilon_{\max}$	0,022	0,0118	5,36	0,022	0,0142	6,32	
$\varepsilon_{ult}$	0,029	0,015	5,17	0,0018	0,0171	9,44	
$\varepsilon_0 - \varepsilon_{res}$	0,002	0,0142	7,10	0,052	0,241	4,63	
$t$	0,46	5,28	11,5	1,61	7,76	4,83	
$S$	965	1720	1,78	733	1229	1,68	
$W_{\sigma}$	60,5	357	5,9	49	299	6,1	

Представляет несомненный интерес эффективность фиброармирования в усталостном сопротивлении цементных композитов. Повышение прочностной устойчивости сопровождается ростом деформаций структурного уплотнения и модуля упругости. В совокупности это обеспечивает сравнительное равенство энергетического отклика обоих композитов на амплитуду нагружения. Наиболее ощутимо влияние фиброармирования на долговечность, что объяснимо [14–17] дисперсной модификацией структуры, сдерживающей развитие микротрещин и формирование критических трещин разрыва.

#### Основные выводы

1. Время разрушения является наиболее чувствительным показателем усталостной трансформации цементных композитов.
2. Удельно-цикловые изменения параметров внутреннего сопротивления могут быть критериальной основой систематизации случайных нестационарных воздействий при анализе усталостных последствий на долговечность железобетонных конструкций.
3. Цементно-матричные композиты характеризуются различной и неоднозначной кинетикой усталостных изменений параметров внутреннего сопротивления, что предопределяет необходимость индивидуализации критериальных условий эксплуатационной пригодности при нестационарных циклических воздействиях.

#### Список литературы

1. Карпенко, Н.И. Общие модели механики железобетона / Н.И. Карпенко. – Москва: Стройиздат, 1996. – 416 с.
2. Зайцев, Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушений / Ю.В. Зайцев. – Москва: Стройиздат, 1982. – 196 с.
3. Журков, С.Н. Некоторые проблемы прочности твердого тела / С.Н. Журков, Э.Н. Тамошевский. – Москва: Наука, 1959. – 68 с.
4. Ярема, С.Я. Стадийность усталостного разрушения и ее следствия / С.Я. Ярема // Физико-химическая механика материалов. – 1973. – №6 – С. 66–74.
5. Ghosni, N. Evaluation of structural behaviour of polypropylene fibre reinforced concrete beam under cyclic loading / N. Ghosni, B. Samali, K. Vessalas // 23rd Australasian

Conf. on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23) 9–12 December 2014. Byron Bay, Australia, 2014.

6. Isojeh, B. Concrete damage under fatigue loading in uniaxial compression / B. Isojeh, M. El-Zeghayar, F.J. Vecchio. – DOI 10.14359/51689477 // *ACI Materials Journal*. – 2017. – N 114 (2). – P. 225–235.

7. Huang, B. Effect of loading frequency on the fatigue behavior of ultra-high toughness cementitious composites in compression / B. Huang, Q. Li, S. Xu, B. Zhou // 14th International Conference on Fracture (ICF 14) June 18–23, 2017. Rhodes, Greece, 2017.

8. Von der Haar, C. A strain model for fatigue loaded concrete / C. von der Haar, S. Marx // *Structural Concrete* – 2017. – N 19(2). – P. 463–471. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/>

9. Регель, В.П. Кинетическая теория прочности твердых тел / В.П. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский – Москва: Наука, 1974. – 560 с.

10. Liu, F. Fatigue strain and damage analysis of concrete in reinforced concrete beams under constant amplitude fatigue loading / F. Liu, J. Zhou. – DOI 10.1155/2016/3950140 // *Shock and Vibration*. – 2016. – No 3. – P. 1–7.

11. Fathima, K.M.P. A thermodynamic framework for the evolution of damage in concrete under fatigue / K.M.P. Fathima, J.M.C. Kishen. – DOI 10.1007/s00419-015-1001-z // *Archive of Applied Mechanics*. – 2015. – N 85(7). – P. 921–936.

12. Liu, F. Research on fatigue strain and fatigue modulus of concrete / F. Liu, J. Zhou. – DOI 10.1155/2017/6272906 // *Advances in Civil Engineering*. – 2017. – No 3. – P. 1–7.

13. Keerthana, K. An experimental and analytical study on fatigue damage in concrete under variable amplitude loading / K. Keerthana, J.C. Kishen // *International Journal of Fatigue*. – 2018. – N 111. – P. 278–288.

14. Influence of the fiber content on the compressive low-cycle fatigue behavior of self-compacting SFRC / E. Poveda, G. Ruiz, H. Cifuentes [et all.] // *International Journal of Fatigue*. – 2017. – No 101. – P. 9–17.

15. Huang, B.-T. Fatigue deformation model of plain and fiber-reinforced concrete based on weibull function / B.-T. Huang, Q.-H. Li, S.-L. Xu. – DOI 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002237 // *Journal of Structural Engineering*. – 2019. – N 145(1).

16. Плюснин, М.Г. Экспериментальное исследование изменчивости деформационных характеристик бетона при сжатии / М. Г. Плюснин, С. В. Цыбакин // *Вестник МГСУ*. – 2020. – Т. 15, № 10. – С. 1390–1398.

17. Попов, В.М. Влияние деформационных характеристик бетона на несущую способность изгибаемых железобетонных элементов / В.М. Попов, М.Г. Плюснин // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2015. – № 8. – С. 5–10.

## References

1. Karpenko, N. I. General models of reinforced concrete mechanics / N.I. Karpenko. – Moscow: Stroyizdat, 1996. – 416 p.

2. Zaitsev, Yu.V. Modeling of deformations and strength of concrete by methods of fracture mechanics / Yu.V. Zaitsev. – Moscow: Stroyizdat, 1982 – 196 p.

3. Zhurkov, S.N. Some problems of solid strength / S.N. Zhurkov, E.N. Tamoshevsky. – Moscow: Nauka, 1959. – 68 p.

4. Yarema, S.Ya. Stages of fatigue failure and its consequences / S.Ya. Yarema // *Physico-chemical mechanics of materials*. – 1973. – No.6 – P. 66–74.

5. Ghosni, N. Evaluation of structural behaviour of polypropylene fibre reinforced concrete beam under cyclic loading / N. Ghosni, B. Samali, K. Vessalas // 23rd Australasian Conf. on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23) 9–12 December 2014. Byron Bay, Australia, 2014.

6. Isojeh, B. Concrete damage under fatigue loading in uniaxial compression / B. Isojeh, M. El-Zeghayar, F.J. Vecchio. – DOI 10.14359/51689477 // *ACI Materials Journal*. – 2017. – N 114 (2). – P. 225–235.

7. Huang, B. Effect of loading frequency on the fatigue behavior of ultra-high toughness cementitious composites in compression / B. Huang, Q. Li, S. Xu, B. Zhou // 14th International Conference on Fracture (ICF 14) June 18–23, 2017. Rhodes, Greece, 2017.
8. von der Haar, C. A strain model for fatigue loaded concrete / C. von der Haar, S. Marx // Structural Concrete – 2017. – N 19(2). – P. 463–471. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/>
9. Regel, V.R. Kinetic theory of strength of solids / V.R. Regel, A.I., Slutsker, E.E. Tomashevsky. – Moscow: Nauka, 1974. – 560 p.
10. Liu, F. Fatigue strain and damage analysis of concrete in reinforced concrete beams under constant amplitude fatigue loading / F. Liu, J. Zhou. – DOI 10.1155/2016/3950140 // Shock and Vibration. – 2016. – No 3. – P. 1–7.
11. Fathima, K.M.P. A thermodynamic framework for the evolution of damage in concrete under fatigue / K.M.P. Fathima, J.M.C. Kishen. – DOI 10.1007/s00419-015-1001-z // Archive of Applied Mechanics. – 2015. – N 85(7). – P. 921–936.
12. Liu, F. Research on fatigue strain and fatigue modulus of concrete / F. Liu, J. Zhou. – DOI 10.1155/2017/6272906 // Advances in Civil Engineering. – 2017. – No 3. – P. 1–7.
13. Keerthana, K. An experimental and analytical study on fatigue damage in concrete under variable amplitude loading / K. Keerthana, J.C. Kishen // International Journal of Fatigue. – 2018. – N 111. – P. 278–288.
14. Influence of the fiber content on the compressive low-cycle fatigue behavior of self-compacting SFRC / E. Poveda, G. Ruiz, H. Cifuentes [et al.] // International Journal of Fatigue. – 2017. – No 101. – P. 9–17.
15. Huang, B.-T. Fatigue deformation model of plain and fiber-reinforced concrete based on weibull function / B.-T. Huang, Q.-H. Li, S.-L. Xu. – DOI 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002237 // Journal of Structural Engineering. – 2019. – N 145(1).
16. Plyusnin, M.G. Experimental study of variability of deformation characteristics of concrete under compression / M.G. Plyusnin, S.V. Tsybakin // Bulletin of MGSU. – 2020. – Vol. 15, No. 10. – P. 1390–1398.
17. Popov, V.M. Influence of deformation characteristics of concrete on the bearing capacity of bent reinforced concrete elements / V.M. Popov, M.G. Plyusnin // Industrial and civil construction. – 2015. – No. 8. – P. 5–10.

УДК 691.163

DOI 10.54734/20722958\_2025\_1\_75

*Казанский государственный архитектурно-строительный университет*Россия, 420043, Казань, ул.Зеленая, д. 1,  
тел.: (843) 510-46-72**Гарипов Айрат Равилевич,**  
соискатель кафедры «Технологии  
строительных материалов, изделий  
и конструкций»  
E-mail: aid-28@mail.ru**Макаров Дмитрий Борисович,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Технологии строительных  
материалов, изделий и конструкций»  
E-mail: makarov@kgasu.ru**Хозин Вадим Григорьевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Технологии строительных  
материалов, изделий и конструкций»  
E-mail: khozin.vadim@yandex.ru**Степанов Сергей Викторович,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Автомобильные дороги,  
мосты и тоннели»  
E-mail: stepanov@kgasu.ru*Kazan State University of Architecture and  
Engineering*Russia, 420043, Kazan, 1, Green St.,  
tel.: (843) 510-46-72**Garipov Airat Ravilevich,**  
Applicant of the department «Technology of  
Building Materials, Products and Structures»  
E-mail: aid-28@mail.ru**Makarov Dmitry Borisovich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Technology of Building  
Materials, Products and Structures»  
E-mail: makarov@kgasu.ru**Khozin Vadim Grigorievich,**  
Doctor of Science, Professor, Head of the  
department «Technology of Building  
Materials, Products and Structures»  
E-mail: khozin.vadim@yandex.ru**Stepanov Sergey Viktorovich,**  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Highways, Bridges and  
Tunnels»  
E-mail: stepanov@kgasu.ru

## МОДИФИКАЦИЯ КРОВЕЛЬНЫХ БИТУМНО-АСБЕСТОВЫХ МАСТИК ТОНКОДИСПЕРСНЫМИ ЛАТЕКСНЫМИ ЭМУЛЬСИЯМИ

А.Р. Гарипов, Д.Б. Макаров, В.Г. Хозин, С.В. Степанов

Широкое распространение в современном строительстве получили мастичные и рулонные покрытия, именуемые мягкими кровельными материалами. Особое место занимают битумно-асбестовые эмульсионные холодные мастики. Использование битумных холодных мастик позволяет получать бесшовные покрытия, значительно снизить трудозатраты при устройстве из них кровель. С помощью модификации мастик полимерами можно увеличить теплостойкость, морозостойкость, эластичность и атмосферостойкость покрытий.

*Ключевые слова: битум, асбест, кровельные покрытия, латексная эмульсия, теплостойкость, морозостойкость*

## MODIFICATION OF ROOFING BITUMEN-ASBESTOS MASTICS BY FINELY DISPERSED LATEX EMULSIONS

A.R. Garipov, D.B. Makarov, V.G. Khozin, S.V. Stepanov

Mastic and rolled coatings, called soft roofing materials, have found the most widespread use in modern construction. Bitumen-asbestos emulsion cold mastics occupy a special place. The use of bitumen cold mastics allows to obtain seamless coatings, significantly reduce labor costs installing roofs from them. Mastics modification with polymers allows to increase heat resistance, frost resistance, elasticity and weather resistance of coatings.

*Keywords: bitumen, asbestos, roofing coverings, latex emulsion, heat resistance, frost resistance*

**ВВЕДЕНИЕ**

Во всех композициях, как кровельных, так и изоляционных, битум подвергается воздействию ультрафиолета, перепадам температуры и влиянию других факторов окружающей среды; наблюдается его старение, связанное с испарением легких фракций, что приводит к появлению усадочных деформаций и трещин, росту температуры хрупкости и снижению пластичности [1, 2]. В результате материал становится хрупким и постепенно разрушается. Значительным недостатком немодифицированного битума является размягчение, начинающееся при температуре 40–45 °С, что приводит к нарушению верхнего слоя кровли [3]. Поэтому были разработаны различные методы улучшения его характеристик [4–6]. Рабочий интервал эксплуатации битума характеризуется интервалом его пластического состояния – разницей между температурами размягчения и хрупкости, и для его увеличения при неизменной температуре размягчения необходимо понизить вязкость и температуру застывания дисперсионной среды [7].

В настоящее время для модификации битумов применяют следующие виды добавок:

1. Наполнители – минеральные или органические порошки и волокниты, которые повышают жесткость, прочность, теплостойкость, но понижают пластичность, трещиностойкость, эластичность битумных композиций.

Прочность битумных композиций, содержащих наполнитель, обусловлена силами когезии, действующими между молекулами битума, и силами адгезии, связывающими наполнитель с битумом. Адсорбционное взаимодействие мальтеновой фракции с поверхностью наполнителя (минерального) приводит к образованию граничных слоев с большей плотностью молекулярной упаковки и, соответственно, прочностью и теплостойкостью. При переходе всей мальтеновой части битума в состояние граничных слоев он превращается в асфальт.

Усиливающее действие наполнителя связано и с распределением напряжений [8–9]. Развивающаяся микротрещина, «упираясь» в частицу наполнителя, прекращает свой рост, который возобновляется только при дополнительном повышении напряжения. В результате возрастает напряжение, необходимое для разрушения изделий. Таким образом, увеличение механической прочности битумных композиций при введении в них наполнителей обусловлено образованием граничных адсорбционных слоев, вызывающих упрочнение.

При анизодиаметричной форме частиц наполнителей, например асбестовых, упрочнение связано и с микроармирующим эффектом. Подобное действие оказывают частицы пластинчатого или чешуйчатого строения (сланец, слюда, тальк). Менее устойчивую структуру создают частицы округлой или изодиаметричной формы. Поэтому для повышения теплостойкости битума требуется ввести значительно меньше волокнистого или чешуйчатого наполнителя, чем пылевидного.

Повышение атмосферостойкости холодной мастики (после испарения воды) при использовании наполнителя, очевидно, также объясняется его большей устойчивостью в адсорбционно-пленочном состоянии, чем в объемном. Если в чистом битуме начинающееся старение быстро распространяется на всю толщу покровного слоя, то при наличии в нем наполнителя оно ограничивается лишь тонкими поверхностными пленками битума, так как возникает сопротивление атмосферостойких частичек наполнителя, которые препятствуют доступу атмосферных факторов (свет, кислород и т.д.) к нижележащим пленкам битума [10, 11].

Существенное влияние наполнители оказывают и на реологические свойства битумов: волокнистые и пластинчатые наполнители придают смесям структурную вязкость, а пылевидные наполнители с круглыми или аналогичными частицами только повышают вязкость, не изменяя ее характера [12].

Наполнители должны хорошо смачиваться битумами, быть химически инертными, иметь достаточно высокую адсорбционную способность, при этом не должны быть гигроскопичными.

В настоящее время наиболее распространенными являются следующие виды наполнителей: асбест, известняк, каолин, тальк, технический углерод (сажа) и др. [13].

2. Латексы – стабилизированные коллоидные водные *дисперсии* полимеров, получаемые эмульсионной полимеризацией. Они являются перспективными полимерными модификаторами для битумно-асбестовых эмульсионных мастик (БАЭМ).

Введение латексов не оказывает отрицательного воздействия на однородность и устойчивость холодных мастик. Это объясняется тем, что дисперсная фаза латекса распределяется в дисперсионной среде битумно-асбестовой мастики [14, 15]. Однако наличие латексов в БАЭМ существенно повышает технологические показатели кровельных покрытий, снижая при этом их условную вязкость.

### ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве наполнителя БАЭМ был выбран асбест – тонковолокнистые минералы класса силикатов (ГОСТ 12871-93). Структура слоистая трубчатая (рис. 1), отличается высокой сорбционной способностью и набухаемостью. Производитель ОАО «Уральский асбестовый горно-обогатительный комбинат», г. Асбест, Свердловская область (ТУ 5721-010-0281476-2011).

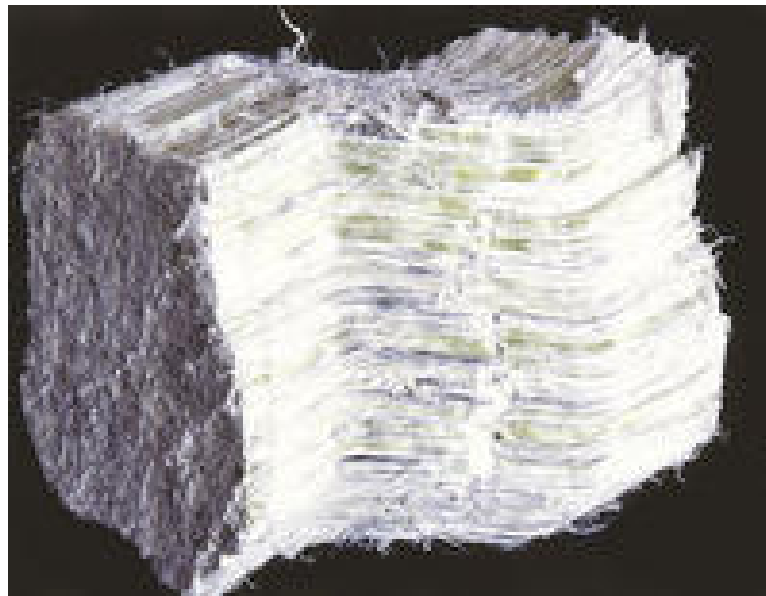


Рис. 1. Хризотил-асбест

Хризотил-асбест ( $3\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) – гидросиликат магния, с химической точки зрения он абсолютно безвреден для организма. Кристаллы хризотил-асбеста имеют необычное строение: они представляют собой тончайшие полые трубочки-фибриллы диаметром  $2,6\cdot 10^{-5}$  мм и длиной до 2...3 см. Такие кристаллы напоминают мягкие целлюлозные волокна хлопковой ваты. В то же время, будучи материалом неорганическим, волокна хризотил-асбеста не горят и выдерживают высокие температуры. Лишь при нагреве до  $700\text{ }^\circ\text{C}$  они теряют химически связанную воду и становятся хрупкими. Плавится хризотил при температуре около  $1500\text{ }^\circ\text{C}$ .

Физико-химические свойства хризотила определяются следующими параметрами:

- Прочность на разрыв, МПа, — более 300.
- Плотность,  $\text{г}/\text{см}^3$ , – 2,4-2,6.
- Температура плавления,  $^\circ\text{C}$ , – 1450-1500.
- Коэффициент трения, ед., – 0,8.
- Щелочестойкость, рН = 9,1-10,3.
- Удельная поверхность,  $\text{м}^2/\text{г}$ , – 20.

В качестве полимерного модификатора БАЭМ был выбран латекс катионный Butonal® NX 4190 (латекс Бутонал, изготовитель – фирма BASF), представляющий собой механически устойчивую латексную водно-полимерную дисперсию с высоким содержанием твердых частиц стирол-бутадиена (рис. 2).

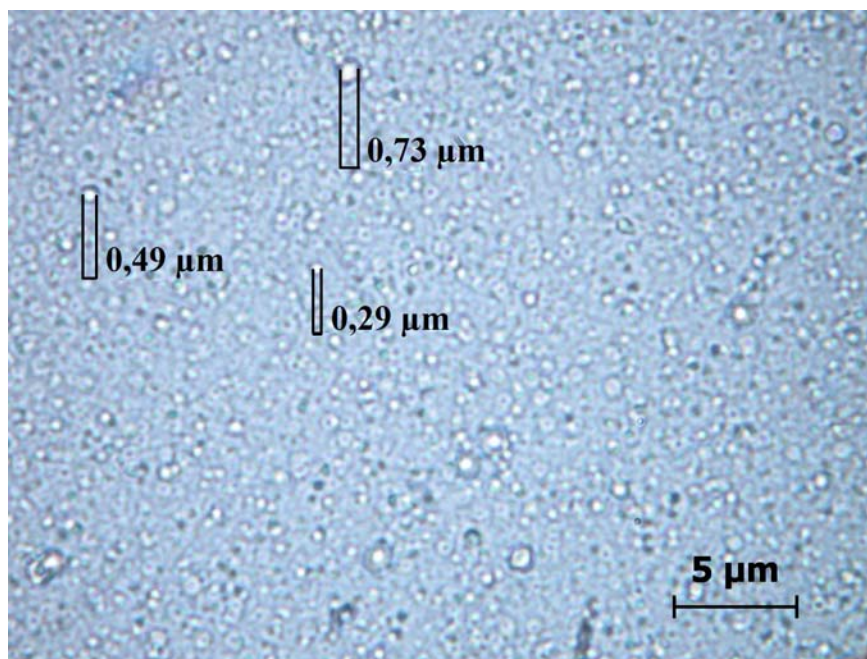


Рис. 2. Оптическая микрофотография латекса Бутонал (увеличение 1000<sup>X</sup>)

Выбранный латекс обеспечивает отличные свойства когезии и адгезии с минеральными компонентами, а также значительно улучшает остаточные свойства, такие, как вынужденная тягучесть, ударная вязкость и прочность на разрыв, восстановление после скручивания и температура размягчения, по сравнению с обычными полимерами (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Физико-механические свойства латекса Бутонал NX 4190

№ п/п	Свойства	Показатель
1	Содержание твердых частиц, %	63,0 – 65,0
2	pH	5,0 – 5,6
3	Вязкость, МПа·с	250 – 2000
4	Связанный стирол, %	24
5	Температура стеклования	минус 53
6	Плотность, кг/л	0,94

Технология получения битумно-асбестовой эмульсионной мастики заключается в следующем:

Вода из системы водоснабжения подается в емкость-дозатор, снабженную электронагревателем, нагревается до 40 °С и подается в смеситель. Далее в смеситель подается асбестовая гидромасса. В течение 10 минут получается однородная водно-асбестовая пульпа. При высокоскоростной циркуляции пульпы в смеситель порционно дозируется битум, разогретый до 120-140 °С. После введения битума готовая смесь циркулирует 20 мин до образования однородной массы.

В готовую битумно-асбестовую эмульсионную мастику вводится латекс при комнатной температуре, затем с помощью насоса готовая модифицированная мастика подается в расходную емкость, откуда она поступает в тару, где ее герметично закрывают согласно ГОСТ 14192-96.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По вышерассмотренному способу для определения оптимальных свойств кровельного покрытия на основе модифицированной БАЭМ была изготовлена серия образцов

битумно-асбестовой эмульсионной мастики с различным содержанием латекса в составе.

Латекс вводился в готовую битумно-асбестовую эмульсионную мастику в количестве 10; 15; 20 % от массы мастики.

Введение в БАЭМ латекса Бутонал приводит к существенному повышению теплостойкости кровельного покрытия. Из рис. 3 видно, что в наибольшей степени теплостойкость повышается у кровельного материала при модификации его Бутоналом в количестве 20 %: с 100 до 135 °С.

При введении латекса Бутонал гибкость образцов на брусе диаметром 10 мм снижается в область низких температур. У состава, модифицированного 20 % Бутонала, этот показатель снижается более значительно – с минус 15 до минус 28 °С (рис. 4).

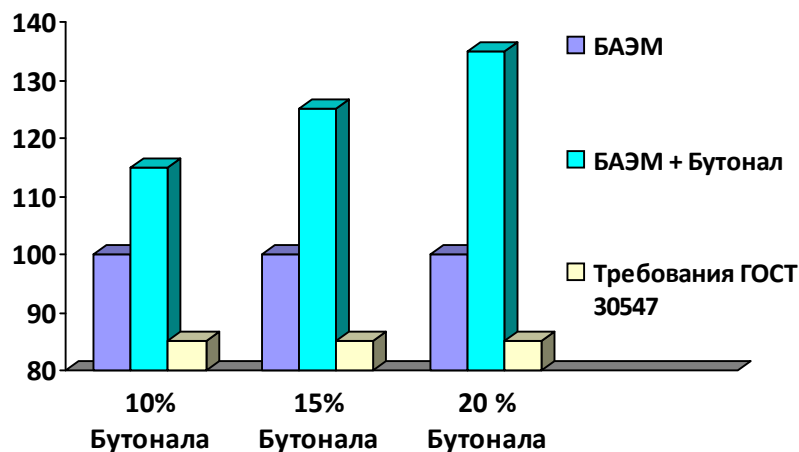


Рис. 3. Теплостойкость кровельного материала на основе БАЭМ, модифицированной латексом Бутонал

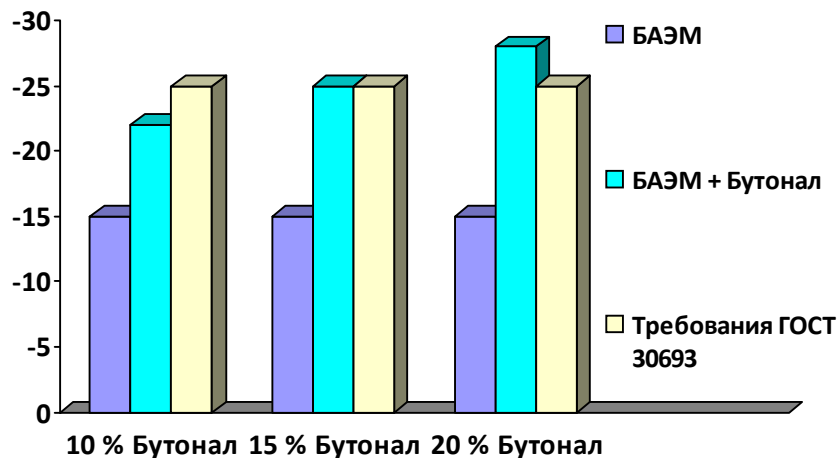


Рис. 4. Гибкость кровельного материала на основе БАЭМ, модифицированной латексом Бутонал

Повышение теплостойкости и гибкости на брусе для всех модифицированных составов можно объяснить однородным распределением водной дисперсии латекса в объеме БАЭМ и высокой концентрацией твердых частиц полимера в самом латексе (63–65 %).

Исходя из предварительно полученных показателей (теплостойкости и гибкости на брусе), для дальнейших исследований свойств кровельного материала на соответствие



требованиям ГОСТ 30693 был предложен оптимальный состав БАЭМ, модифицированной катионным латексом Бутонал NX 4190 до 15 %, который полностью удовлетворяет требованиям стандарта (табл. 2). Введение латекса в количестве более 15 %, несомненно, приводит не только к улучшению характеристик кровельного материала, превосходящих требования ГОСТ, но и к его удорожанию.

Т а б л и ц а 2

Оптимальный состав БАЭМ, модифицированной латексом Бутонал NX 4190

Компоненты	Содержание, %
1. Битум	до 40
2. Асбест хризотилковый 7-го сорта	до 10
3. Вода	до 50
4. Латекс Бутонал NX 4190	до 15

Далее был проведен ряд дополнительных испытаний разработанного состава на соответствие требованиям ГОСТ 30693. Была доказана эффективность модификации БАЭМ латексом Бутонал NX 4190 в количестве 15 % (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Свойства БАЭМ, модифицированной 15 % латекса Бутонал NX 4190

№	Показатель	Состав		
		БАЭМ	БАЭМ + 15 % Бутонала	Требования ГОСТ 30693-2000
1	Теплостойкость, °С, не менее	100	125	85
2	Гибкость на бруске с закруглением радиуса 5 мм, °С	минус 15	минус 25	минус 25
3	Водопоглощение через 24 часа, %, не более	1,20	0,89	5,0
4	Водонепроницаемость при давлении 0,001 МПа в течение не менее 72 ч	Следы влаги отсутствуют		Отсутствие следов влаги
5	Прочность сцепления с основанием, МПа, не менее	0,14	0,17	0,1
6	Условная прочность, МПа, не менее	0,49	0,54	0,2
7	Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	126	138	100

Как видно из табл. 3, при введении латекса Бутонал увеличивается интервал пластического состояния кровельного материала – возрастают теплостойкость до 125 °С, гибкость на бруске до минус 25 °С, кроме того, повышаются прочность сцепления с основанием от 0,14 до 0,17 МПа, условная прочность при разрыве от 0,49 до 0,54 МПа и относительное удлинение при разрыве от 126 до 138 %.

### ВЫВОДЫ

1. В результате исследования определены оптимальная рецептура и технология приготовления полимермодифицированной битумно-асбестовой эмульсионной мастики.

2. Исследованы основные свойства кровельных материалов, полученных на основе разработанных оптимальных составов модифицированной битумно-асбестовой эмульсионной мастики. Установлено, что полученный кровельный материал отличается повышенной теплостойкостью, гибкостью, прочностью сцепления с основанием, условной прочностью при разрыве и относительным удлинением.

### Список литературы

1. Рахимов, Р.З. Современные кровельные материалы / Р.З. Рахимов, Г.Ф. Шигапов. – Казань: Центр инновационных технологий, 2001. – 430 с.

2. Аюпов, Д.А. Стабилизация битумполимерных дисперсий поверхностно-активными веществами / Д.А. Аюпов. – DOI 10.52409/20731523\_2023\_2\_17, EDN NACQDE // Известия КГАСУ. – 2023. – №2(64). – С. 17–26.
3. Белевич, В.Б. Устройство долговечных плоских кровель из битумно-полимерных рулонных материалов в зимнее время / В.Б. Белевич, Д.А. Сиденко // Кровельные и гидроизоляционные материалы. – 2005. – №1. – С. 42–43.
4. Сокова, С.П. Потенциальные возможности устройства и ремонта кровель и технические решения по выбору кровельных материалов / С.П. Сокова // Строительные материалы. – 1996. – №11. – С. 2–11.
5. Антонова, И.И. Битумные эмульсии для гидроизоляционных и кровельных покрытий / И.И. Антонова, Д.А. Аюпов, Ю.Н. Хакимуллин, В.Г. Хозин. – DOI 10.52409/20731523\_2023\_1\_6, EDN DPAXIV // Известия КГАСУ. – 2023. – №1(63). – С.6–14.
6. Мосалев, Ю.Г. Полимеры – будущее мягких кровельных материалов / Ю.Г. Мосалев // Строительные материалы. – 1997. – №12. – С. 8–10.
7. Попов, К.Н. Крыши и кровли / К.Н. Попов, М.Б. Каддо // Строительный эксперт. – 1999. – №9. – С.13–15.
8. Москалев, Ю.Г. Полимерная кровля / Ю.Г. Москалев // Строительный эксперт. – 1999. – №7. – С. 19.
9. Шульженко, Ю.П. Полимерные кровельные материалы / Ю.П. Шульженко // Строительные материалы. – 1998. – №11. – С. 8–10.
10. Мурафа, А.В. Новые анионоактивные битумные эмульсии для дорожных, кровельных и гидроизоляционных покрытий / А.В. Мурафа, Л.Ш. Сибгатуллина, Д.Б. Макаров, В.Г. Хозин. – EDN HZIRJN // Строительные материалы. – 2005. – №11. – С.22–25.
11. Compositions bitumen / polymere non gelifiables et stables au stockage a temperature elevee, leur procede de preparation et jour application a la production de liants bitume / polymere pour revetements / Germananaud Laurent, Planche Jean-Pascal, Phung Trung Kiet; ELF ANTAR FRANCE №9303492.
12. Lihui, Lu. Chemical recycling technologies for PVC waste and PVC-containing plastic waste: A review / Lihui Lu, Weiming Li, Ying Cheng, Meng Liu // Waste Management. – 2023. – №166. – P. 245–258.
13. Медунов, В.И. Высокоэффективные материалы для кровли и гидроизоляции / В.И. Медунов, Ю.А. Горелов // Строительные материалы. – 1996. – №11. – С.15–16.
14. Руденский, А.В. Реологические свойства битумоминеральных материалов / А.В. Руденский, И.М. Руденская. – Москва: Высшая школа, 1971. – 131 с.
15. Makarov, D. Compatibility studies of mixed thermoplastic rubber with road bitumen. / D. Makarov, D. Ayupov, A. Murafa, V. Khozin // Open civil engineering journal. – 2014. – Vol.8, no 1. – P. 124–129.

## References

1. Rakhimov, R.Z. Modern roofing materials / R.Z. Rakhimov, G.F. Shigapov. – Kazan: Center for Innovative Technologies, 2001. – 430 p.
2. Ayupov, D.A. Stabilization of bituminous polymer dispersions by surfactants / D.A. Ayupov. – DOI 10.52409/20731523\_2023\_2\_17, EDN NACQDE // News KSUAE. – 2023. – No. 2(64). – P. 17–26.
3. Belevich, V.B. Installation of durable flat roofs from bitumen-polymer roll materials in winter / V.B. Belevich, D.A. Sidenko // Roofing and waterproofing materials. – 2005. – No. 1. – P. 42–43.
4. Sokova, S.P. Potential possibilities for installing and repairing roofs and technical solutions for choosing roofing materials / S.P. Sokova // Construction materials. – 1996. – No. 11. – P. 2–11.
5. Antonova, I.I. Bitumen emulsions for waterproofing and roofing coatings / I.I. Antonova, D.A. Ayupov, Yu.N. Khakimullin, V.G. Khozin. – DOI

10.52409/20731523\_2023\_1\_6, EDN DPAXIV // News KSUAE. – 2023. – No. 1(63). – P.6–14.

6. Mosalev, Yu.G. Polymers are the future of soft roofing materials / Yu.G. Mosalev // Construction materials. – 1997. – No. 12. – P. 8–10.

7. Popov, K.N. Roofs and roofs / K.N. Popov, M.B. Caddo // Construction Expert. – 1999. – No. 9. – P.13–15.

8. Moskalev, Yu.G. Polymer roofing / Yu.G. Moskalev // Construction expert. – 1999. – No. 7. – P. 19.

9. Shulzhenko, Yu.P. Polymer roofing materials / Yu.P. Shulzhenko // Construction materials. – 1998. – No. 11. – P. 8–10.

10. Murafa, A.V. New anionic bitumen emulsions for road, roofing and waterproofing coatings / A.V. Murafa, L.Sh. Sibgatullina, D.B. Makarov, V.G. Khozin. – EDN HZIRJN // Construction materials. – 2005. – No. 11. – P.22–25.

11. Compositions bitumen / polymere non gelifiables et stables au stockage a temperature elevee, leur procede de preparation et jour application a la production de liants bitume / polymere pour revetements / Germananaud Laurent, Planche Jean-Pascal, Phung Trung Kiet; ELF ANTAR FRANCE No. 9303492.

12. Lihui, Lu. Chemical recycling technologies for PVC waste and PVC-containing plastic waste: A review / Lihui Lu, Weiming Li, Ying Cheng, Meng Liu // Waste Management. – 2023. – №166. – P. 245–258.

13. Medunov, V.I. Highly effective materials for roofing and waterproofing / V.I. Medunov, Yu.A. Gorelov // Construction materials. – 1996. – No. 11. – P.15–16.

14. Rudensky, A.V. Rheological properties of bitumen-mineral materials / A.V. Rudensky, I.M. Rudenskaya. – Moscow: Higher School, 1971. – 131 p.

15. Makarov, D. Compatibility studies of mixed thermoplastic rubber with road bitumen. / D. Makarov, D. Ayupov, A. Murafa, V. Khozin // Open civil engineering journal. – 2014. – Vol.8, no 1. – P. 124–129.

УДК 691

DOI 10.54734/20722958\_2025\_1\_83

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства  
Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Москвин Роман Николаевич**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Эксплуатация автомобильного  
транспорта»  
E-mail: moskva\_in@mail.ru

**Белякова Елена Александровна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Кадастр недвижимости и право»  
E-mail: var\_lena@mail.ru

Penza State University of Architecture  
and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Moskvin Roman Nikolaevich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the Department «Operation of Automobile  
Transport»  
E-mail: moskva\_in@mail.ru

**Belyakova Elena Aleksandrovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the department «Real estate cadastre and right»  
E-mail: var\_lena@mail.ru

## КИНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НАРАСТАНИЯ ПРОЧНОСТИ КАРБОНАТНО-ШЛАКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ, АКТИВИЗИРОВАННЫХ ЩЕЛОЧНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ

Р.Н. Москвин, Е.А. Белякова

Определены особенности влияния карбонатных солей натрия и калия и их комбинаций со щелочью NaOH на кинетику нарастания прочности карбонатно-шлаковых композиций. Выявлено влияние активаторов твердения щелочи NaOH, соды и поташа на кинетику набора прочности карбонатно-шлаковых композитов в различном соотношении и при различных способах формования. Показано, что в присутствии шлакового вяжущего и щелочи происходит активация образования гидросиликатов кальция с различным кристаллохимическим строением, что приводит к повышению прочности. Кроме того, при воздействии щелочной среды на кремнезем шлака образуется гель кремниевой кислоты, способствующей цементации системы.

*Ключевые слова:* карбонатно-шлаковые композиции, активизация, кинетика нарастания прочности, щелочные компоненты, шлаковое вяжущее, гидросиликаты кальция

## KINETIC FEATURES OF STRENGTH GROWTH OF CARBONATE-SLAG COMPOSITES ACTIVATED BY ALKALINE COMPONENTS

R.N. Moskvin, E.A. Belyakova

The features of the influence of sodium and potassium carbonate salts and their combinations with NaOH alkali on the kinetics of strength growth of carbonate-slag composites are determined. The influence of NaOH, soda and potash hardening activators on the kinetics of strength gain of carbonate-slag composites in different ratios and with different molding methods is determined. It is shown that in the presence of slag binder and alkali, the formation of calcium hydrosilicates with different crystallochemical structure is activated, which leads to an increase of strength. In addition, when slag silica is exposed to an alkaline environment, a silicic acid gel is formed, which promotes system cementation.

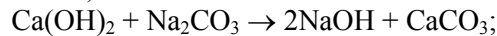
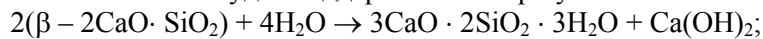
*Keywords:* carbonate-slag compositions, activation, kinetics of strength increase, alkaline components, slag binder, calcium hydrosilicates

Расположение щелочных и щелочноземельных металлов в ряду «основности» по щелочной активности оксидов и гидроксидов по В.Д. Глуховскому представляется следующим образом: Rb, Cs, K, Na, Li, Ba, Sr, Ca, Mg, т.е. слева направо в порядке уменьшения рН среды и растворимости гидроксидов. Из этого ряда следует, что едкие щелочи являются сильными основаниями и что на их основе, как и на основе гидроокисей щелочноземельных металлов, можно получить гидравлические вяжущие

вещества. Это относится к синтезу алюмосиликатов щелочных металлов, аналогичных шабазиту, мордениту, анальциму, при высоком содержании щелочей.

Щелочные компоненты, как известно, являются составной частью шлакощелочных вяжущих, вводятся в них в виде соединений щелочных металлов в количестве 5–15 % от массы шлака в пересчете на сухое вещество и дают в водных растворах щелочную реакцию. При малых добавках щелочей и щелочных солей 1,5–3,0 %, в отличие от исследований школы В.Д. Глуховского, нельзя говорить, что носителями прочности являются указанные синтезированные минералы, так как количество их, при малых содержаниях катиона К и Na, будет низким. В данном случае действие щелочей и щелочных солей сводится к усилению растворения шлакового стекла и катализу реакций гидратации шлака, аналогично гидротермальному катализу кристаллических разновидностей кремнезема, корунда и других тугоплавких соединений. Комбинация растворов  $K_2CO_3+NaOH$  и  $Na_2CO_3+NaOH$  очень эффективна для гидротермального синтеза не только цеолитов, но и корунда, рубина, кварца и т.д. Баррер Р. отмечает, что для синтеза кристаллов кварца наилучшим минерализатором оказался КОН, для рубина –  $NaOH+Na_2CO_3$ .

Представляет интерес сравнение влияния карбонатных солей  $Na_2CO_3$ ,  $K_2CO_3$  и их комбинаций со щелочью NaOH на кинетику нарастания прочности карбонатно-шлаковых композиций. Карбонатные соли  $Na_2CO_3$  и  $K_2CO_3$  превращаются в соответствующие щелочи NaOH и КОН с дополнительным образованием кальцита в результате реакции каустификации. В карбонатно-шлаковых вяжущих скорость образования щелочей будет лимитироваться скоростью гидратации и гидролиза шлака, т.е. динамическое равновесие в системе будет поддерживаться при условии:



$$V_{Ca(OH)_2} = V_{NaOH}.$$

Поэтому роль щелочного активизатора гидролитического разложения шлакового стекла выполняет вторичная щелочь. Выделение ее автокатализирует процесс твердения.

В исследованиях школы Глуховского В.Д. не отмечались, по нашим сведениям, факты автокаталитичности реакционных процессов при образовании щелочей и гидролитическом разложении шлакового стекла. Ранее процессу каустификации карбонатных солей в вяжущих, как важному процессу акта твердения, не уделялось серьезного внимания. Мы считаем, что автокаталитический процесс может в значительной мере определять скорость твердения и состав продуктов гидратации в карбонатно-шлаковых, карбонатно-цементных и в более сложных вяжущих (карбонатно-шлакоопочные, карбонатно-алюмошлаковые и др.). Добавление небольшого количества щелочи к щелочным карбонатам, на наш взгляд, должно за счет повышения pH с 10–12 до 14 катализировать начальный гидролиз шлакового стекла.

Для сравнения влияния активизаторов твердения щелочи NaOH, соды  $Na_2CO_3$  и поташа  $K_2CO_3$  на кинетику набора прочности карбонатно-шлаковых композитов в соотношении К : Ш=2:3 по массе при различных способах формования (прессование, виброуплотнение) были проведены исследования составов с индивидуальными активизаторами и их смесями в различных пропорциях. Содержание индивидуальных активизаторов и их смесей во всех составах было принято 2 % от массы смешанного вяжущего. Давление прессования составляло 15 МПа, влажность смесей при прессовании – 10,7 %, при виброуплотнении – 23 %. На данных составах были отформованы образцы-кубики с ребром 30 мм, которые хранились во влажных условиях при  $t=20-25^\circ C$  в течение 28 суток. Результаты испытаний приведены в таблице и на рис. 1–2, из которых видно, что поташ и сода являются в малых дозировках более эффективными активизаторами твердения карбонатно-шлаковых композитов, чем щелочь, при тех же дозировках. У прессованных образцов с поташом в 28-суточном возрасте прочность составила 49,3 МПа, с содой – 51,3 МПа, что превышает прочность образцов со щелочью соответственно на 39 и 45 %. Позитивное действие щелочных карбонатных солей на прочность виброуплотненных образцов в 28-суточном возрасте значительно выше. У образцов с поташом прочность составила 74,7 МПа, с содой – 63,3 МПа, что превышает прочность образцов со щелочью соответственно на 187 и 156 %. Можно полагать, что в оптимально оводненных системах диффузионный подвод реагентов и отвод растворимых продуктов реакции в межчастичное пространство

облегчаются. Сочетание поташа и щелочи положительно сказывается на приросте прочности виброуплотненных образцов по сравнению с прессованными. При этом бинарные смеси щелочных солей  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и  $\text{K}_2\text{CO}_3$  и щелочей  $\text{NaOH}$  активизируют набор ранней прочности композиций в большей степени у виброуплотненных, чем у прессованных, обеспечивая повышенную нормативную прочность. Таким образом, сильная активизация твердения карбонатно-шлаковых вяжущих на липецком шлаке обусловлена «содовым парадоксом» I рода, когда растворимость шлакового стекла повышается при замене щелочи  $\text{NaOH}$  на карбонатные соли натрия и калия. Активирующее действие смесей  $\text{NaOH}$  и карбонатных солей («содовый парадокс» II рода) менее значительно, но оно превосходит индивидуальное действие щелочи  $\text{NaOH}$ .

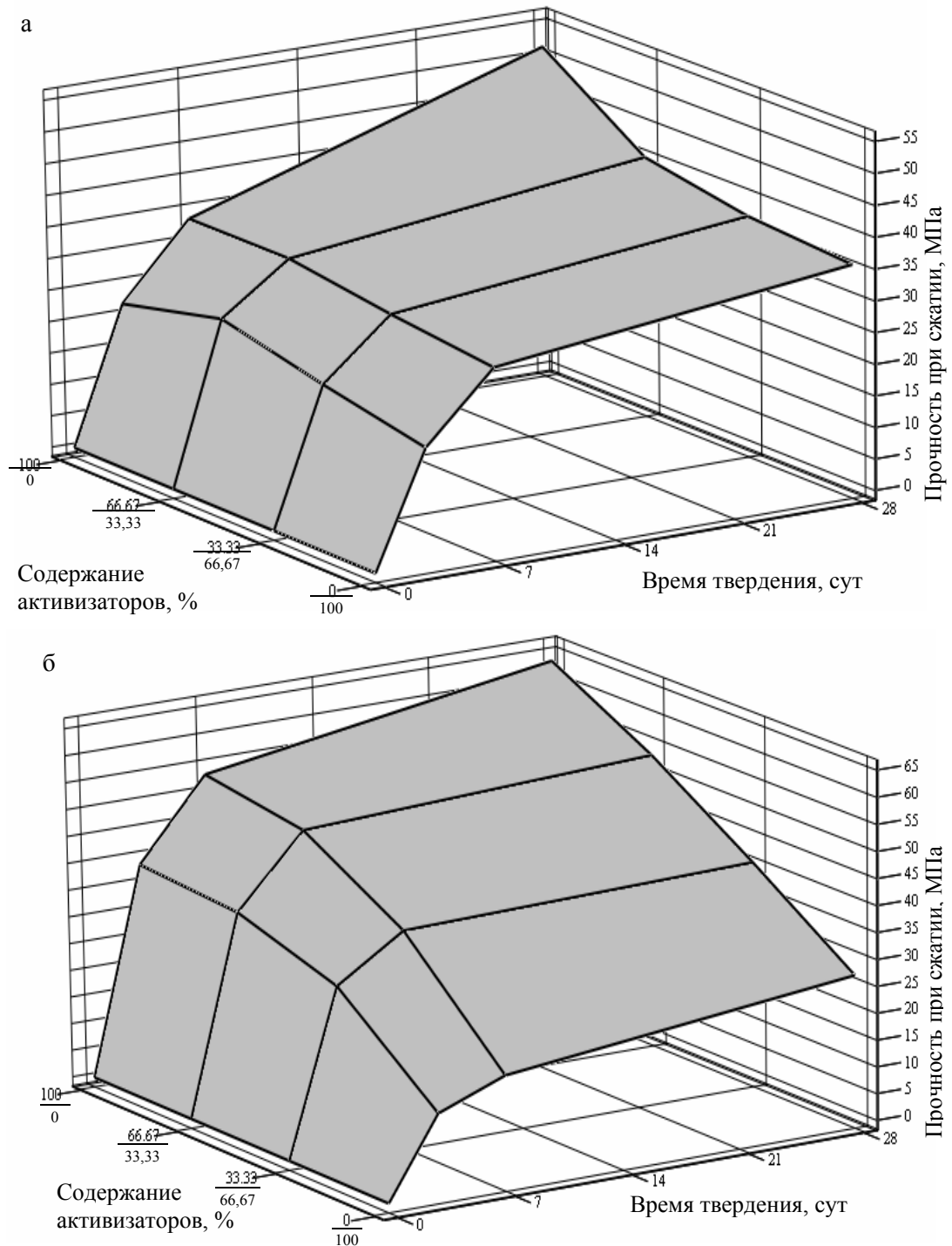


Рис. 1. Зависимость предела прочности при сжатии прессованных (а) и виброуплотненных (б) КШВ от времени твердения и соотношения применяемых активизаторов: в числителе – доля соды, в знаменателе – доля щелочи

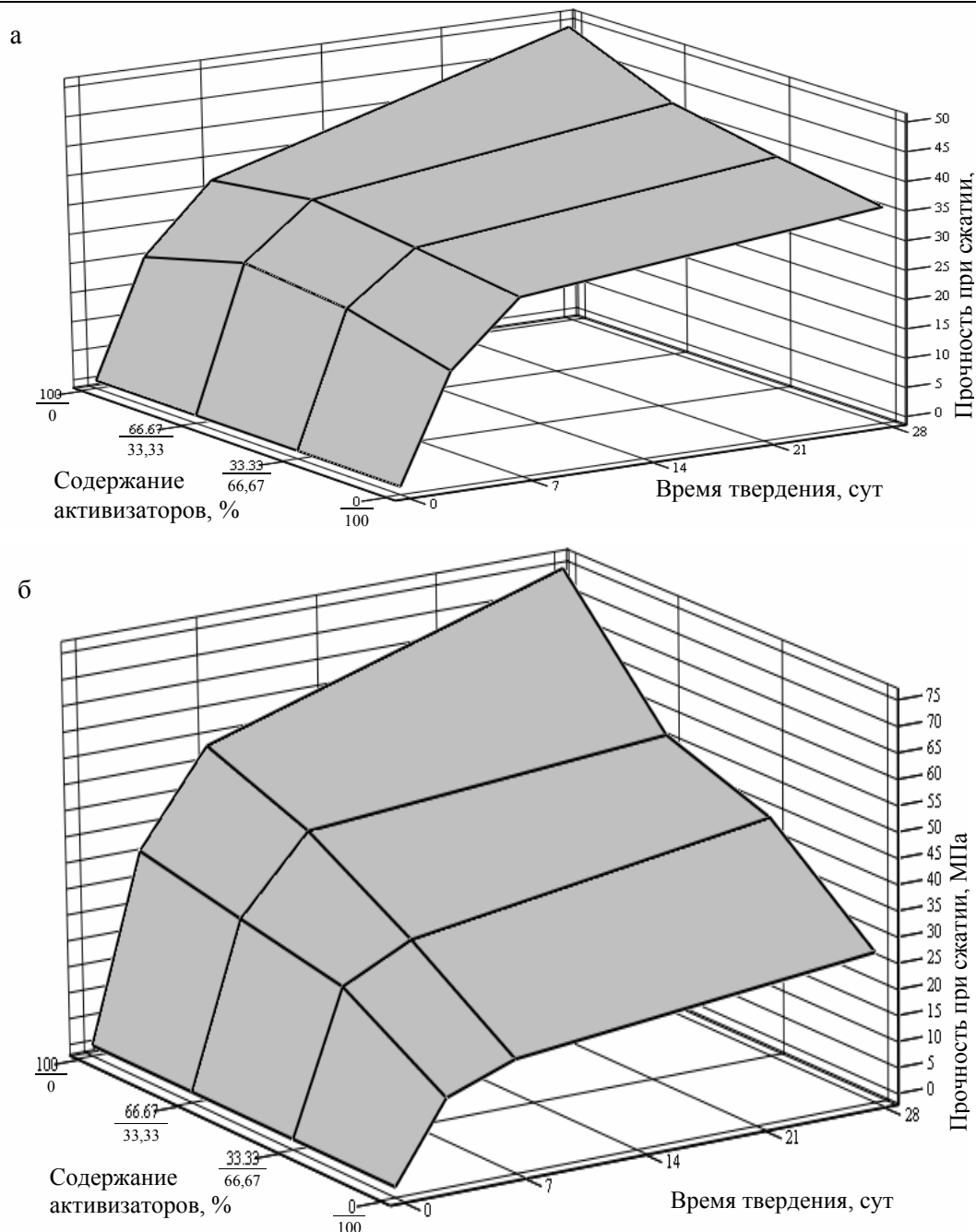


Рис. 2. Зависимость предела прочности при сжатии прессованных (а) и виброуплотненных (б) КШВ от времени твердения и соотношения применяемых активизаторов: в числителе – доля поташа, в знаменателе – доля щелочи

Гипотетически можно предположить, что основными факторами, определяющими более высокую скорость формирования прочности композитов в присутствии  $K_2CO_3$ , являются следующие:

- более высокая растворимость карбоната калия (110 г/в 100 мл) при низкой формовочной влажности смесей по сравнению с  $Na_2CO_3$  (20 г/в 100 мл);
- образование кристаллогидратов  $K_2CO_3 \cdot nH_2O$  с более низким содержанием воды;
- более быстрая, за одинаковые промежутки времени, каустификация карбоната калия с образованием  $CaCO_3$ , кристаллизующегося на исходных частицах кальцита;
- меньшая гидратируемость катиона  $K^+$  и большее разупрочняющее действие его на кластерную структуру воды.

Рентгенофазовый анализ показал заметное различие в процессах 3-летнего твердения карбонатно-шлаковых вяжущих, активизированных щелочью и содой.

Влияние активизирующих добавок NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> на прочность карбонатно-шлаковых композиций

№ состава	Состав смеси по массе	Вид формирования	Вид активизатора и его доля, %			Прочность, МПа, через сут					
			Сода	Поташ	Щелочь	3 сут	7 сут	28 сут	270 сут	540 сут	1000 сут
1	К : Ш=40 : 60	Прессование	–	–	100	18,3	29,0	35,5	41,8	45,2	47,6
2			–	100	–	20,0	31,5	49,3	52,5	55,4	58,7
3			100	–	–	21,6	33,3	51,3	55,5	56,9	61,1
4			33	67	–	21,8	29,4	46,1	48,4	50,1	52,0
5			67	33	–	22,7	31,7	48,5	51,6	53	55,6
6			33	–	67	21,7	30,9	36,8	40,7	42,3	44,4
7			67	–	33	25,6	33,3	39,6	46,5	50,5	55,6
8			–	33	67	22,9	31,5	38,3	40,9	43,8	45,3
9			–	67	33	24,8	33,9	41,8	50,4	53,2	55,9
10	К : Ш=40 : 60	Виброуплотнение	–	–	100	15,0	19,8	26,8	37,0	39,9	41,5
11			–	100	–	35,6	53,3	74,7	79,4	80,9	81,6
12			100	–	–	38,3	53,0	63,3	67,8	70,0	72,6
13			33	67	–	36,3	56,7	60,0	62,1	62,9	68,0
14			67	33	–	38,2	57,2	61,1	63,7	64,9	69,2
15			33	–	67	30,8	38,9	40,3	43,5	44,9	48,8
16			67	–	33	36,9	50,0	52,9	54,6	56,2	59,7
17			–	33	67	27,2	33,6	43,8	46,3	47,5	49,6
18			–	67	33	31,3	45,6	51,1	54,4	55,8	59,4

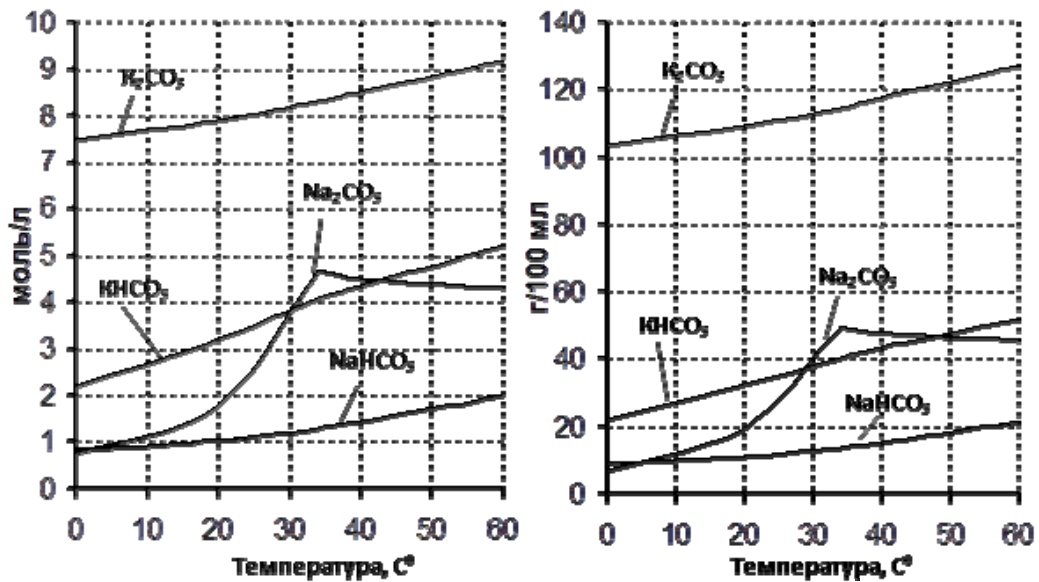


Рис. 3. Растворимость в воде карбонатов и бикарбонатов Na и K



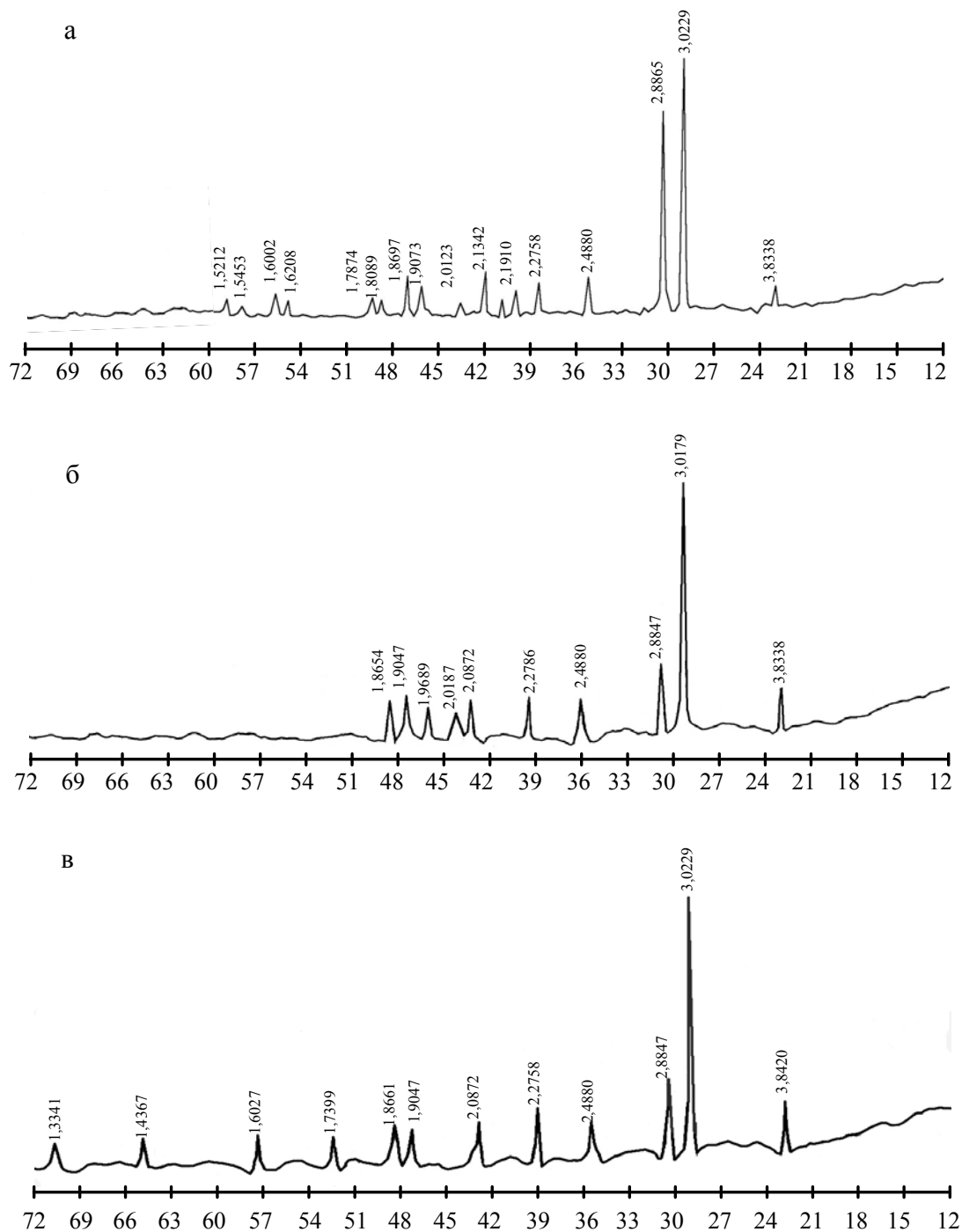


Рис. 4. Дифрактограммы:

а – доломитизированного известняка Иссинского карьера; б – карбонатно-шлакового вяжущего, активизированного щелочью (3 года твердения); в – карбонатно-шлакового вяжущего, активизированного содой (3 года твердения)

Образец 1. Известняк Иссинского карьера.

$2\theta$	$d$	$I, \%$	$2\theta$	$d$	$I, \%$	$2\theta$	$d$	$I, \%$
23,20	3,8338	6	43,35	2,1342	13	56,80	1,6208	3
29,55	3,0229	100	45,05	2,0123	3	57,60	1,6002	3
30,98	2,8865	78	47,68	1,9073	10	59,85	1,5453	2
36,10	2,4880	13	48,70	1,8697	12	60,90	1,5212	2
39,60	2,2758	10	50,45	1,8089	2			
41,20	2,1910	8	51,10	1,7874	3			

Образец 2. Карбонатно-шлаковое вяжущее К : Ш = 40 : 60

активизатор – щелочь – 2 % от массы вяжущего

2θ	d	I, %	2θ	d	I, %	2θ	d	I, %
23,20	3,8338	13	39,55	2,2786	13	47,75	1,9047	15
29,60	3,0179	100	43,35	2,0872	12	48,82	1,8654	13
31,00	2,8847	27	44,90	2,0187	5			
36,10	2,4880	13	46,10	1,9689	5			

Образец 3. Карбонатно-шлаковое вяжущее К : Ш = 40 : 60

активизатор – сода – 2 % от массы вяжущего

2θ	d	I, %	2θ	d	I, %	2θ	d	I, %
23,15	3,8420	13	39,60	2,2758	19	52,60	1,7399	3
29,55	3,0229	100	43,35	2,0872	13	57,50	1,6027	4
31,00	2,8847	28	47,75	1,9047	11	64,90	1,4367	2
36,10	2,4880	9	48,80	1,8661	13	70,60	1,3341	2

При анализе рентгенограмм образцов известняка и образцов карбонатно-шлаковых композитов (отобранных от различных партий) отмечается снижение интенсивности линий кальцита 3,0179 и 2,8847 Å. Характерным является значительное снижение интенсивности линии 2,8847 Å относительно линии 3,0179 Å, что свидетельствует о возможности связывания части кальцита в гидратные фазы. Появление линии 1,9679 Å говорит об активации образования в присутствии шлака и щелочи гидросиликатов кальция. Линии 1,93 и 1,82 Å предположительно могут быть отнесены к ксонотлиту  $6\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$ , линии 1,63 – к афвелиту, 1,422 – к фазе CSH(II).

В ы в о д ы :

1. В присутствии шлакового вяжущего и щелочи происходит активация образования гидросиликатов кальция с различным кристаллохимическим строением, что приводит к повышению прочности; кроме того, при воздействии щелочной среды на кремнезем шлака происходит образование геля кремниевой кислоты, способствующей цементации системы.

2. В образце 3, активизированном содой с известняком, отмечается снижение интенсивности линии доломита 2,8847 Å относительно линии кальцита 3,0229 Å, что может свидетельствовать о возможности образования карбонатов в гидратные фазы, а также образовании брусита. Линия 1,7399 Å может быть отнесена к фюшагиту, что указывает на активацию образования гидросиликатов кальция.

#### Список литературы

1. Саркисов, Ю.С. Влияние карбонатных добавок на усадочные деформации цементного камня / Ю.С. Саркисов, В.К. Козлова, Е.В. Божок [и др.] // Техника и технология силикатов. – 2018. – Т. 25, № 1. – С. 7–11.
2. Рахимова, Н.Р. Композиционные шлакощелочные вяжущие с минеральными добавками различного типа активности / Н.Р. Рахимова, Р.З. Рахимов // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. – 2013. – № 16. – С. 204–216.
3. Тараканов, О.В. Оценка влияния карбонатного микронаполнителя на кинетику начального структурообразования и состав гидратных фаз цементных систем / О.В. Тараканов, В.И. Калашников, Е.А. Белякова, К.А. Стешкина // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №2. – С. 40–46.

#### References

1. Sarkisov, Yu.S. Effect of carbonate additives on shrinkage deformations of cement stone / Yu.S. Sarkisov, V.K. Kozlova, E.V. Bozhok [et al.] // Silicate engineering and technology. – 2018. – Vol. 25, No. 1. – P. 7–11.
2. Rakhimova, N.R. Composite slag-alkaline binders with mineral additives of various types of activity / N.R. Rakhimova, R.Z. Rakhimov // Bulletin of the Volga Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences. – 2013. – No. 16. – P. 204–216.
3. Tarakanov, O.V. Assessment of the effect of carbonate microfiller on the kinetics of initial structure formation and the composition of hydrate phases of cement systems / O.V. Tarakanov, V.I. Kalashnikov, E.A. Belyakova, K.A. Steshkina // Regional architecture and engineering. – 2014. – No. 2. – P. 40–46.

УДК 69: 338.2

DOI 10.54734/20722958\_2025\_1\_90

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77**Куимова Елена Ивановна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Математика и математическое  
моделирование»  
E-mail: lena-kui@mail.ru**Логанина Валентина Ивановна**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Управление качеством»  
E-mail: loganin@mai.ru*Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова*Россия, 115054, Москва,  
Стремянный переулок, д.36**Зайцева Мария Владимировна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры международного бизнеса  
E-mail: zajc@yandex.ru*Тамбовский государственный технический университет*Россия, 392000, г.Тамбов,  
ул.Советская, д.106/5**Езерский Валерий Александрович**,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Архитектура  
и градостроительство»  
E-mail: wiz75micz@rambltr.ru*Penza State University of Architecture and Construction*Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77**Kuimova Elena Ivanovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the Department «Mathematics and  
Mathematical Modeling»  
E-mail: lena-kui@mail.ru**Loganina Valentina Ivanovna**,  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the Department «Quality  
Management»  
E-mail: loganin@mai.ru*Plekhanov Russian University of Economics*Russia, 115054, Moscow,  
36, Stremyanny Lane**Zaytseva Maria Vladimirovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
Department of International Business  
E-mail: zajc@yandex.ru*Tambov State Technical University*Russia, 392000, Tambov,  
106/5, Sovetskaya St.**Ezerskiy Valery Aleksandrovich**,  
Doctor of Sciences, Professor of the  
Department «Architecture and Urban  
Planning»  
E-mail: wiz75micz@rambltr.ru

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ: МЕТОД АДДИТИВНОЙ СВЕРТКИ

Е.И. Куимова, М.В. Зайцева, В.И. Логанина, В.А. Езерский

Представлен метод аддитивной свертки для определения критериев поставщика сухих строительных смесей. При определении модели качества используется приём построения функций принадлежности критериев (основан на обработке матрицы сравнительных оценок). Удовлетворенность эксперта предложенными критериями при реализации альтернатив определяется лингвистической переменной.

*Ключевые слова: сухие строительные смеси, качество, метод аддитивной свертки, адгезия, морозостойкость*

## QUALITY ASSESSMENT OF DRY BUILDING MIXES: ADDITIVE CONVOLUTION METHOD

E.I. Kuimova, M.V. Zaytseva, V.I. Loganina, V.A. Ezerskiy

Information is provided on the criteria for the supplier of dry building mixes based on the additive convolution method. To create a quality model, a method of constructing criteria membership

functions based on processing a matrix of comparative estimates has been applied. Expert satisfaction with proposed criteria alternative realization is defened by linguistic variable.

*Keywords: dry building mixes, quality, additive convolution method*

Значительный рост объема строительства вызвал увеличение спроса на специализированные материалы для отделки. К таким материалам в первую очередь необходимо отнести современные сухие строительные смеси (ССС). При этом существующие СССР для отделки стен зданий позволяют получить покрытия, обладающие достаточной адгезионной прочностью, морозостойкостью. В связи с этим перед строительной организацией встает вопрос о выборе поставщика СССР. В настоящее время рынок СССР представлен очень большой номенклатурой производителей, выпускающих смеси достаточно хорошего качества. На наш взгляд, выбор поставщика СССР может быть осуществлен с помощью математических методов, применяемых для анализа и планирования экономических решений в условиях неопределенности [1–5].

Рассмотрим применение метода аддитивной свертки при выборе СССР, производимых 4 производителями. Технические характеристики СССР приведены в табл. 1 [6–9].

Т а б л и ц а 1

Технические характеристики штукатурных смесей

Производитель	Адгезия, МПа	Жизнеспособность, ч	Морозостойкость	Прочность на сжатие, МПа	Расход, кг/м <sup>2</sup>	Водоудерживающая способность, %
Предприятие 1	0,4	1,75	35	1,0	1,5	97
Предприятие 2	0,7	3,0	35	3,0	1,3	98
Предприятие 3	0,5	5,0	35	5	0,8	96-97
Предприятие 4	0,75	1,25	50	3,5	1,0	98

Для выбора СССР проведем исследование как методом построения функций принадлежности, основанном на обработке матрицы оценок, так и методом аддитивной свертки, которые помогут сделать оптимальный выбор предприятия – производителя СССР.

Первоначально определим альтернативы по использованию штукатурных смесей:

стратегия  $a_1$  – предприятие 1;

стратегия  $a_2$  – предприятие 2;

стратегия  $a_3$  – предприятие 3;

стратегия  $a_4$  – предприятие 4.

Для оценки альтернатив определим следующие критерии:

$c_1$  – адгезия;  $c_2$  – жизнеспособность;  $c_3$  – морозостойкость;  $c_4$  – прочность на сжатие;  $c_5$  – расход;  $c_6$  – водоудерживающая способность.

Применим метод построения функций принадлежности критериев, основанный на обработке матрицы сравнительных оценок.

Проведем парное сравнение важности критериев для определения из относительных весовых коэффициентов. Шкала для составления матрицы сравнения следующая: 1 – одинаковая значимость; 3 – слабое превосходство; 5 – существенное превосходство; 7 – очевидное превосходство; 9 – абсолютное превосходство. Оценку критерия  $c_i$  по сравнению  $c_j$  с точки зрения важности для рассматриваемых альтернатив обозначим  $c_{ij}$ . Для обеспечения согласованности элементов матрицы примем  $c_{ij} = \frac{1}{c_{ji}}$ . Оценки  $c_{ij}$  составляют матрицу  $A$ .

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 7 & 5 & 3 & 9 & 9 \\ 1/7 & 1 & 1/3 & 1/5 & 5 & 3 \\ 1/5 & 3 & 1 & 1/3 & 7 & 5 \\ 1/3 & 5 & 2 & 1 & 9 & 7 \\ 1/9 & 1/5 & 1/7 & 1/9 & 1 & 1/3 \\ 1/9 & 1/3 & 1/5 & 1/7 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

Найдем собственный вектор ( $w$ ) матрицы  $A$ , решая уравнение

$$Aw = \lambda w, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – собственное значение матрицы  $A$ ;  $w$  – собственный вектор матрицы  $A$ .

Это уравнение имеет ненулевое решение в том случае, когда определитель матрицы  $|A - \lambda E|$  равен нулю.

$$\begin{vmatrix} 1-\lambda & 7 & 5 & 3 & 9 & 9 \\ 1/7 & 1-\lambda & 1/3 & 1/5 & 5 & 3 \\ 1/5 & 3 & 1-\lambda & 1/3 & 7 & 5 \\ 1/3 & 5 & 2 & 1-\lambda & 9 & 7 \\ 1/9 & 1/5 & 1/7 & 1/9 & 1-\lambda & 1/3 \\ 1/9 & 1/3 & 1/5 & 1/7 & 3 & 1-\lambda \end{vmatrix} = 0.$$

В процессе решения численными методами уравнения шестой степени получаем максимальный корень  $\lambda = 6,457$ .

Решаем систему уравнений.

$$\begin{cases} -5,457w_1 + 7w_2 + 5w_3 + 3w_4 + 9w_5 + 9w_6 = 0 \\ \frac{1}{7}w_1 - 5,457w_2 + \frac{1}{3}w_3 + \frac{1}{5}w_4 + 5w_5 + 3w_6 = 0 \\ \frac{1}{5}w_1 + 3w_2 - 5,457w_3 + \frac{1}{3}w_4 + 7w_5 + 5w_6 = 0 \\ \frac{1}{3}w_1 + 5w_2 + 3w_3 - 5,457w_4 + 9w_5 + 7w_6 = 0 \\ \frac{1}{9}w_1 + \frac{1}{5}w_2 + \frac{1}{7}w_3 + \frac{1}{9}w_4 - 5,457w_5 + \frac{1}{3}w_6 = 0 \\ \frac{1}{9}w_1 + \frac{1}{3}w_2 + \frac{1}{5}w_3 + \frac{1}{7}w_4 + 3w_5 - 5,457w_6 = 0 \end{cases}$$

Заменяем последнее уравнение системы условием нормировки

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 = 1. \quad (2)$$

В результате решения измененной системы получаем нормированный собственный вектор:

$$w_1 = 0,466; w_2 = 0,073; w_3 = 0,139; w_4 = 0,260; w_5 = 0,023; w_6 = 0,039.$$

При поочередной подстановке условий нормировки вместо других уравнений системы результат решения не изменяется.

В итоге получаем относительные весовые коэффициенты важности критериев.

Рассматриваем множества из 4 альтернатив  $a_1, a_2, a_3, a_4$ . Для каждого критерия  $c_i$  может быть рассмотрено нечеткое множество  $C_i$ :

$$C_i = \left\{ \mu_{c_i} / a_1; \mu_{c_i} / a_2; \mu_{c_i} / a_3; \mu_{c_i} / a_4 \right\}, \quad (3)$$

где  $\mu_{c_i} / a_j \in [0; 1]$  – оценка альтернативы  $a_j$  по критерию  $c_i$ , характеризующая степень соответствия альтернативы показателю, определяемому критерием  $c_i$ .

Правило для выбора наилучшей альтернативы может быть записано в виде пересечения соответствующих нечетких множеств, ей соответствует операция поиска минимума, выполняемая над их функциями принадлежности:

$$\mu(a_i) = \min \mu_{c_i}(a_i). \quad (4)$$

В качестве лучшей выбирается альтернатива  $a^*$ , имеющая наибольшее значение функции принадлежности:

$$\mu(a^*) = \max(a_i). \quad (5)$$

С учетом средней экспертной оценки технических характеристик штукатурных смесей по относительной шкале от 0 до 1 по возрастанию в лучшую сторону формируем нечеткие множества, характеризующие альтернативные варианты использования сухой строительной смеси с учетом коэффициентов относительной важности критериев:

	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$
$a_1$	1	0,8	0,8	0,6	0,6	0,8
$a_2$	0,6	0,6	0,8	0,8	0,6	1
$a_3$	0,6	1	0,8	1	1	0,8
$a_4$	1	0,6	1	0,8	0,8	1

$$C_1^{0,466} = \{0,466/a_1; 0,2796/a_2; 0,2796/a_3; 0,466/a_4\};$$

$$C_2^{0,073} = \{0,0584/a_1; 0,0438/a_2; 0,073/a_3; 0,0438/a_4\};$$

$$C_3^{0,139} = \{0,1112/a_1; 0,1112/a_2; 0,1112/a_3; 0,1112/a_4\};$$

$$C_4^{0,260} = \{0,156/a_1; 0,208/a_2; 0,26/a_3; 0,208/a_4\};$$

$$C_5^{0,023} = \{0,0138/a_1; 0,0138/a_2; 0,023/a_3; 0,0184/a_4\};$$

$$C_6^{0,039} = \{0,0312/a_1; 0,039/a_2; 0,0312/a_3; 0,039/a_4\}.$$

По каждой альтернативе  $a_j$  выбираем минимальное и получаем множество

$$\{0,0138/a_1; 0,0138/a_2; 0,023/a_3; 0,0184/a_4\}. \quad (6)$$

Максимальное значение принадлежности имеет альтернатива  $a_3$  – предприятие 3. Именно эта рекомендация является наиболее эффективной для выбора ССС.

Чтобы подтвердить или опровергнуть сделанные выводы, дополнительно рассмотрим метод ранжирования альтернатив на основе аддитивной свертки, обобщенной на случай нечеткой исходной информации. Используем треугольное представление нечетких оценок альтернатив (на основе экспертных оценок) и относительных коэффициентов важности критериев (на основе ранее сделанных расчетов). То есть, определив для каждого нечеткого числа  $X$  его левую ( $X'$ ) и правую ( $X''$ ) границы, устанавливаем для каждой лингвистической оценки интервал, который будет служить числовой характеристикой лингвистической формулировки.

При оценке значимости критериев предлагается следующая шкала для лингвистических оценок значимости критериев: 1 – практически неважный (0 – 0,1); 2 – не очень важный (0 – 0,4); 3 – довольно важный (0,3 – 0,7); 4 – важный (0,5 – 0,9); 5 – очень важный (0,8 – 1).

Значения термов этого множества представлены на рис. 1.

Беря во внимание ранее найденные коэффициенты относительной важности, критерии получили следующие лингвистические оценки:  $c_1$  = «очень важный»,  $c_2$  = «довольно важный»,  $c_3$  = «довольно важный»,  $c_4$  = «очень важный»,  $c_5$  = «важный»,  $c_6$  = «не очень важный».

В дополнение к оценке важности критериев рассматривается лингвистическая переменная, которая представляет собой степень удовлетворенности эксперта предложенными критериями при возможной реализации альтернатив  $a_1, a_2, a_3, a_4$ . Для лингвистической оценки удовлетворенности выбраны следующие значения: 1 – низкая (0 – 0,4), 2 – средняя (0,3 – 0,7), 3 – высокая (0,6 – 1), 4 – очень высокая (0,8 – 1). Термы принадлежности представлены на рис.2.

Была изучена степень удовлетворенности экспертов предложенными критериями, и в табл. 2 приведена их усредненная оценка.

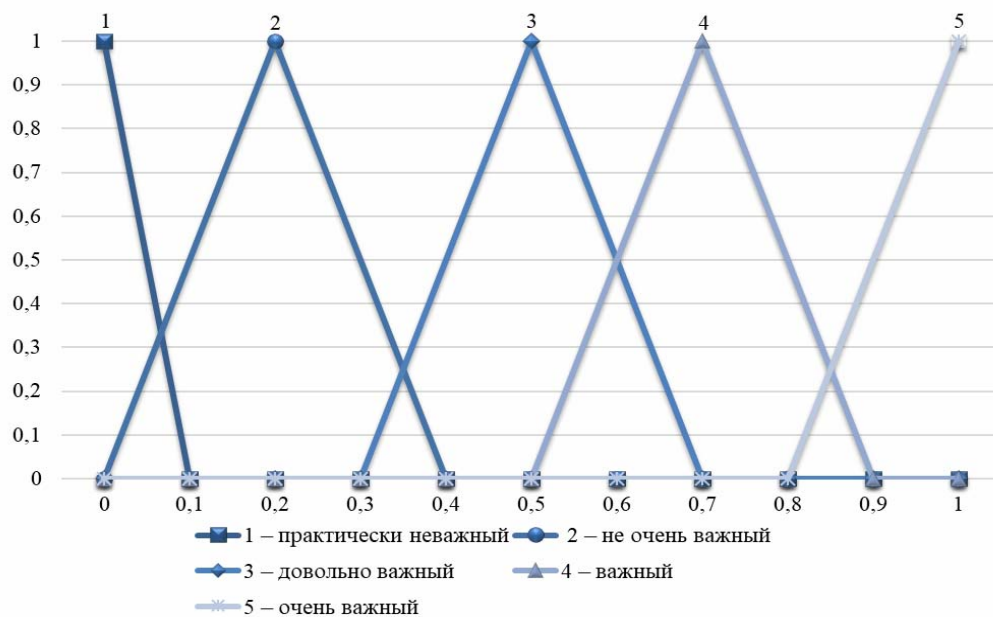


Рис. 1. Функции принадлежности термов важности критериев

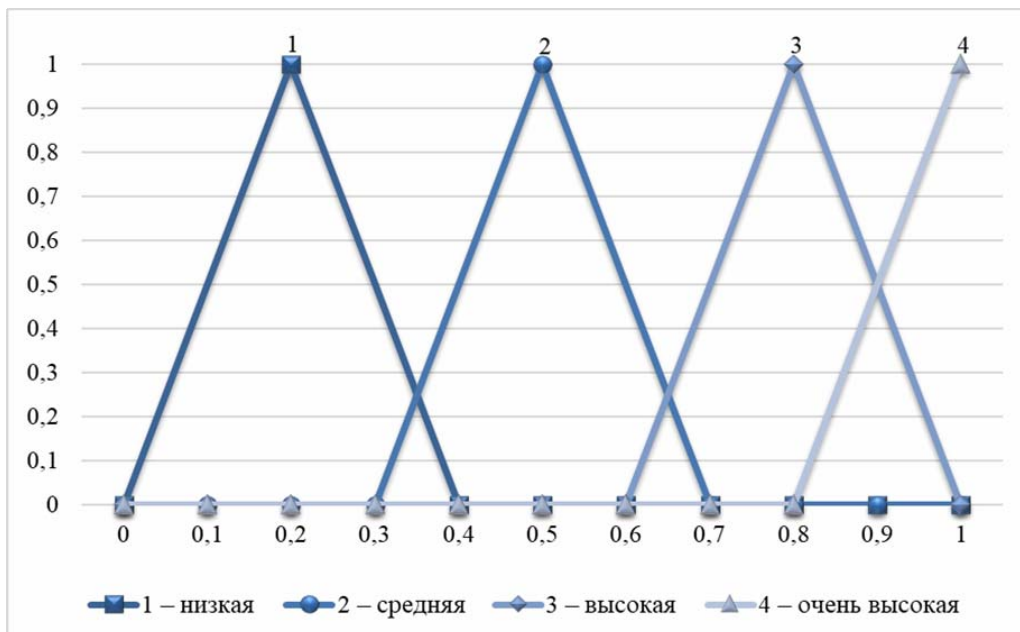


Рис. 2. Функции принадлежности термов удовлетворенности критериев

Т а б л и ц а 2

Средняя экспертная оценка альтернатив по степени удовлетворенности критериев

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
$c_1$	очень высокая	высокая	высокая	средняя
$c_2$	средняя	средняя	высокая	высокая
$c_3$	средняя	очень высокая	высокая	очень высокая
$c_4$	очень высокая	средняя	очень высокая	высокая
$c_5$	очень высокая	высокая	высокая	средняя
$c_6$	средняя	средняя	высокая	высокая

Обозначим  $R_{ij}$  оценку по  $i$ -му критерию  $j$ -й альтернативы. Взвешенную оценку  $R_j$   $j$ -й альтернативы вычисляем по формуле  $R_j = \sum_{i=1}^6 w_i R_{ij}$ .

Поскольку использование этой формулы предполагает перемножение переменных, заданных функциями принадлежности треугольного вида, необходимо ввести правила их перемножения: нечеткое число  $Z = X \cdot Y$  также определяется функцией принадлежности треугольного вида, а границы и вершина находятся следующим образом:

$$Z' = X' \cdot Y', Z'' = X'' \cdot Y'', Z^B = X^B \cdot Y^B$$

Результаты расчетов сведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Критерии	Диапазон			a1			a2			a3			a4		
	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_1$	$c_2$	$c_3$
$c_1$	0,8	1	1	0,8	1	1	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,8	1	1
$c_2$	0,5	0,7	0,9	0,6	0,8	1	0,3	0,5	0,7	0,8	1	1	0,3	0,5	0,7
$c_3$	0,3	0,5	0,7	0,6	0,8	1	0,6	0,8	1	0,6	0,8	1	0,8	1	1
$c_4$	0,8	1	1	0,3	0,5	0,7	0,6	0,8	1	0,8	1	1	0,6	0,8	1
$c_5$	0	0,2	0,4	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,8	1	1	0,6	0,8	1
$c_6$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	0,8	1	1	0,6	0,8	1	0,8	1	1

Результаты вычислений приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Расчёт взвешенной оценки для первой альтернативы

Критерии	Показатели		
	начало	середина	конец
$c_1$	$0,8 \cdot 0,8 = 0,64$	$1 \cdot 1 = 1$	$1 \cdot 1 = 1$
$c_2$	$0,5 \cdot 0,6 = 0,3$	$0,7 \cdot 0,8 = 0,56$	$0,9 \cdot 1 = 0,9$
$c_3$	$0,3 \cdot 0,6 = 0,18$	$0,5 \cdot 0,8 = 0,4$	$0,7 \cdot 1 = 0,7$
$c_4$	$0,8 \cdot 0,3 = 0,24$	$1 \cdot 0,5 = 0,5$	$1 \cdot 0,7 = 0,7$
$c_5$	$0 \cdot 0,3 = 0$	$0,2 \cdot 0,5 = 0,1$	$0,4 \cdot 0,7 = 0,28$
$c_6$	$0 \cdot 0,6 = 0$	$0,2 \cdot 0,8 = 0,16$	$0,4 \cdot 1 = 0,4$
Сумма	1,36	2,72	3,98

Взвешенная оценка  $j$ -й альтернативы  $R_j$  является результатом линейной комбинации нечетких чисел. Она будет иметь функцию принадлежности треугольного вида. Таким образом, получаем координаты для построения термы взвешенной оценки  $R_1$  (табл. 5).

Т а б л и ц а 5

Координаты для графического изображения  $R_1$

$R_1$	Показатели		
	начало	середина	конец
$x$	1,36	2,72	3,98
$y$	0	1	0

Продолжив расчет свертки, получим графическое изображение взвешенных оценок альтернатив  $R_1, R_2, R_3, R_4$  (рис. 3).

Для вычисления приоритета каждой альтернативы на числовой оси определяются нечеткие числа, представляющие взвешенные оценки альтернатив, и их границы. При



выборе приоритета альтернативы находится точка пересечения правой границы соответствующего ей нечеткого числа с границами нечетких чисел, расположенных правее на числовой оси.

Аддитивная свертка представленной информации дала следующий результат:

$$\mu(j) = \{0,8/a_1; 0,3/a_2; 1/a_3; 0,9/a_4\},$$

что позволяет и теперь считать лучшей альтернативой стратегию  $a_3$  – предприятие 3.

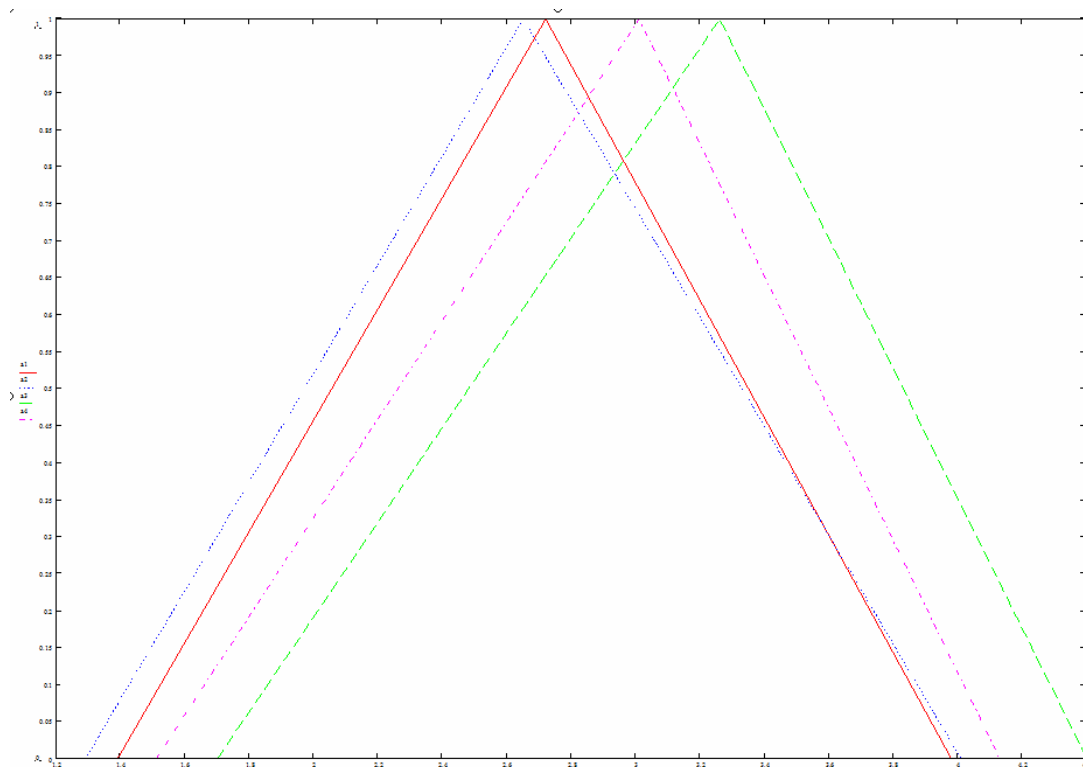


Рис. 3. Графическое изображение взвешенных оценок альтернатив

### Выводы

Установлено, что сравнительная оценка качества сухих строительных смесей может быть проведена с применением метода аддитивной свертки. Результаты, полученные с применением метода аддитивной свертки, коррелируют с данными, полученными методом построения функций принадлежности, что свидетельствует о правомерности применения метода аддитивной свертки при сравнительном анализе качества продукции разных производителей.

### Список литературы

1. Evans, J.R. The Management and Control of Quality / J.R. Evans, M.L. William. – Fourth Edition. – South-Western: Cincinnati, 1999.
2. Андрейчиков, А.В. Анализ, синтез, планирование решений в экономике / А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. – Москва: Финансы и статистика, 2000. – 368 с.
3. Ramsey, C.A. A methodology for assessing sample representativeness. Scandinavian / C.A. Ramsey, A.D. Hewitt // Journal of Statistics. – 2014. – 41 (2). – P. 277–290
4. Xie M. Statistical techniques for quality / M. Xie. T.N. Goh // The TQM Magazine. – 1999. – Vol. 11, iss. 4. – P.238–242.
5. Логанина, В.И. К вопросу о регулировании технологических процессов производства бетона / В.И. Логанина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2009. – № 3–4 (603–604). – С. 42–45.
6. ГОСТ Р 51901.1-2002. Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем. – Москва, 2002.

7. Логанина, В.И., Зайцева, М.В. Обеспеченность качества сухих строительных смесей / В.И. Логанина, М.В. Зайцева // *Alitinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси.* – 2020. – №4. – С.63–67.

8. Uchaeva, T.V. Analysis of the risk at the finishing of the building products and construction of paint compositions / T.V. Uchaeva, V.I. Loganina // *Case Studies in Construction Materials.* – 2018. – Vol. 8. – P. 213–216.

9. Логанина, В.И. Оценка качества сухих строительных смесей с учетом вариабельности сырья / В.И. Логанина, М.В. Зайцева, Е.И. Куимова, Д.К. Галкина // *Региональная архитектура и строительство.* – 2021. – № 3 (48). – С. 74–77.

### References

1. Evans, J.R. *The Management and Control of Quality* / J.R. Evans, M.L. William. – Fourth Edition. – South-Western: Cincinnati, 1999.

2. Andreychikov, A.V. *Analysis, synthesis, decision planning in economics* / A.V. Andreychikov, O.N. Andreychikova. – Moscow: Finance and Statistics, 2000. – 368 p.

3. Ramsey, C.A. A methodology for assessing sample representativeness. *Scandinavian / C.A. Ramsey, A.D. Hewitt // Journal of Statistics.* – 2014. – 41 (2). – P. 277–290.

4. Xie, M. Statistical techniques for quality / M. Xie. T.N. Goh // *The TQM Magazine,* – 1999. – Vol. 11, iss. 4. – P.238–242.

5. Loganina, V.I. On the regulation of technological processes of concrete production / V.I. Loganina // *News of higher educational institutions. Construction.* – 2009. – № 3–4 (603–604). – P. 42–45.

6. GOST R 51901.1-2002. Risk management. Risk analysis of technological systems. – Moscow, 2002.

7. Loganina, V.I. Quality assurance of dry building mixes / V.I. Loganina, M.V. Zaitseva // *Alitinform: Cement. Concrete. Dry mixes.* – 2020. – №4. – С.63–67.

8. Uchaeva, T.V. Analysis of the risk at the finishing of the building products and construction of paint compositions / T.V. Uchaeva, V.I. Loganina // *Case Studies in Construction Materials.* – 2018. – Vol. 8. – P. 213–216.

9. Loganina, V.I. Assessment of the quality of dry building mixes taking into account the variability of raw materials / V.I. Loganina, M.V. Zaitseva, E.I. Kuimova, D.K. Galkina // *Regional architecture and engineering.* – 2021. – No. 3 (48). – P. 74–77.

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

## BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

УДК 699.844.1

DOI 10.54734/20722958\_2025\_1\_98

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,*

Россия, г. Санкт-Петербург,  
Политехническая ул., д. 29

**Рыбаков Владимир Александрович,**  
доктор технических наук, доцент Высшей  
школы промышленно-гражданского  
и дорожного строительства  
E-mail: fishermanoff@mail.ru

**Цветкова Анна Андреевна,**  
аспирант

*ООО «Совби»*

Россия, г. Санкт-Петербург, Пискаревский  
пр. 2, к.2

**Селиверстов Анатолий Владимирович,**  
генеральный директор

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23–29–00564,  
<https://rscf.ru/project/23-29-00564/>.

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,*

Russia, Saint-Petersburg, 29,  
Polytechnicheskaya St.

**Rybakov Vladimir Aleksandrovich,**  
Doctor of Sciences, Assistant Professor of  
Higher School of Industrial, Road and Civil  
Engineering  
E-mail: fishermanoff@mail.ru

**Tsvetkova Anna Andreevna,**  
Post-graduate student

*LLC «Sovbi»*

Russia, Saint-Petersburg, 2, building 2,  
Piskarevsky av.

**Seliverstov Anatoly Vladimirovich,**  
General director

### РАЦИОНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОГРАЖДАЮЩИХ ЛЕГКИХ СТАЛЕБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ

В.А. Рыбаков, А.В. Селиверстов, А.А. Цветкова

Приведены результаты исследования образцов ограждающих стеновых легких сталебетонных панелей (панелей ЛСБК) с воздушным зазором различной конфигурации: с облицовкой гипсокартонными листами с одной и двух сторон, без облицовки, с гидроизоляционным разрывом «Техноэласт ХПП» («Технониколь»). Целью проведенного исследования являлась качественная оценка звукоизолирующей способности образцов легких сталебетонных панелей. Показано, что по характеру кривых все фрагменты образцов имеют сходную форму изменения звукоизоляции по частотам. Наименьшей звукоизолирующей способностью образцы обладают на частоте 315 Гц, наибольшей – на частоте 630 Гц. Выявлено, что наибольшую прибавку в звукоизоляции обеспечил один слой ГКЛ, добавленный к образцу с одной из сторон. Показано, что панель ЛСБК двухслойная с воздушным разрывом с дополнительной облицовкой с двух сторон листами ГКЛ 12,5 мм в один слой удовлетворяет требованиям по звукоизоляции для перегородок между комнатами и квартирами для помещений с комфортными условиями. Предложено использовать панель ЛСБК данной конфигурации в качестве межкомнатных и межквартирных перегородок для помещений с комфортными условиями.

*Ключевые слова: легкие сталебетонные панели, звукоизолирующая способность, экспериментальное исследование, индекс изоляции воздушного шума, частотная характеристика*

## RATIONAL PARAMETERS OF ENCLOSING LIGHTWEIGHT STEEL-CONCRETE STRUCTURES

V.A. Rybakov, A.V. Seliverstov, A.A. Tsvetkova

The object of the research is samples of lightweight steel-concrete panels (LSCS panels) with an air gap of various configurations: lined with gypsumboard sheets on one on both sides, without cladding, with a waterproofing membrane «Technoelast HPP»(Technonicol). The purpose of this study is a qualitative assessment of the sound insulation capacity of the samples of light steel concrete panels. It is shown that, by the nature of the curves, all fragments of the samples have a similar form of change of acoustic insulation by frequencies. The samples have the lowest sound insulation ability at a frequency of 315 Hz, the highest at frequency 630 Hz. It is shown, that the greatest increase in sound insulation is provided by a layer of gypsumboard sheet added to one of the side of the construction. It is shown, that the LSCS double-layer panel with an air gap with additional cladding on both sides with one layer of 12.5mm gypsumboard sheets (meets the requirements of sound insulation) as partitions between rooms and apartments in residential buildings. It is proposed to use the LSCS panels of this configuration as partitions between rooms and apartments in residential buildings with comfortable conditions.

*Keywords: lightweight steel-concrete panels, sound insulation ability, experimental study, air noise insulation index, frequency response*

### ВВЕДЕНИЕ

Защита населения от вредного воздействия шума является вызовом современности и важной экологической проблемой. Правовое регулирование вопросов шумоизоляции происходит на всех уровнях: международном, федеральном, региональном, местном.

На международном уровне действует ГОСТ ISO 9612–2016 «Acoustics. Noise measurement for the purpose of evaluating human exposure to noise. Method of measurements at workplaces» (Акустика. Измерения шума для его воздействия на человека. Метод измерений на рабочих местах), а также ряд других документов. На федеральном уровне основными документами, регламентирующими шумоизоляцию помещений, являются СП 23-103-2003 «Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий» (далее СП 23-103-2003), в котором нормируются индексы изоляции воздушного шума ограждающими конструкциями  $R_w$ , индексы ударного шума  $L_{nw}$ , а СП 51-13330-2011 «Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003».

Теория звукоизоляции начала формироваться в 50-х годах XX века. Кремер Л. [1], Клюкин И.Н. [2], Заборов В.И. [3], Боголепов И.И. [4, 5], Пестряков И.И. [6], Салтыков И.П. [7], Седов М.С. [8], Бобылев В.Н. [9] и ряд других [10, 11] – ученые, которые внесли значимый вклад в развитие теории и практических аспектов звукоизоляции зданий. Соотношения и экспериментальные данные, полученные ими, нашли отражение в методике расчета звукоизоляции, приведенной в современных нормативных документах, в том числе СП 23-103-2003, в котором для расчета индекса звукоизоляции применяется графоаналитический метод и строятся частотные характеристики, зависящие от плотности материала, его толщины, количества и вида слоев звукоизолирующей конструкции.

Экспериментальные исследования звукоизолирующих свойств строительных конструкций в русскоязычной литературе приурочены, как правило, к верификации теоретических выводов [7]; либо исследуются модификации конструкций из существующих материалов с целью улучшения их свойств, например путем создания звукоизолирующих мостиков [12]. Новые конструкционные материалы становятся объектами исследования нечасто. В 2000–2020-х годах в основном исследовались звукоизолирующие свойства таких относительно новых строительных материалов, как пеностекло [13, 14], керамические поризованные блоки [15], виброшумоизоляционный материал Пенотерм [6].

В англоязычной литературе начала XX века описаны исследования звукоизоляционных свойств ряда новых материалов: triply periodic minimal surface [16] (тройные периодические минимальные поверхности – инновационные пористые материалы,

характеризующиеся значительным увеличением площади к занимаемому объему), honeycomb [17] («состоящий из сот»), metamaterial [18] (конструкционный материал, разработанный Дэвидом Р. Смитом в 2001 году, обладающий уникальными акустическими, электромагнитными и иными свойствами [19]), MR fluid based-circular [20] (магнитореологические жидкости, состоящие из ферромагнитных частиц, взвешенных в масле-носителе), областью применения которых являются не столько строительная, сколько судостроительная и авиакосмическая отрасли. Исследования, посвященные звукоизолирующим свойствам типично строительных конструкционных материалов, в англоязычной литературе достаточно скудны [21].

Остро чувствуется нехватка исследований звукоизолирующих свойств новых конструкционных материалов, применяемых в строительстве. Прежде всего это композитные конструкционные материалы [22, 23], которые все больше и больше становятся востребованы на рынке, и поэтому несомненна актуальность исследований их физико-механических свойств.

Примером таких материалов являются легкие сталебетонные конструкции (ЛСБК), состоящие из легких стальных тонкостенных профилей (профилей ЛСТК), пространство между которыми заполнено пенобетоном. По технологии ЛСБК изготавливаются как несущие (стены, перекрытия), так и ограждающие (стены, перегородки) конструкции. Каркас перегородки ЛСБК заводского изготовления представлен на рис. 1. Каркас состоит из двух полупанелей, соединенных между собой так, чтобы стоечные профили располагались со смещением друг относительно друга и не образовывалась зона повышенной звукопроводимости. По периметру зоны контакта полупанелей производится оклейка демпфирующим материалом для создания воздушного зазора.

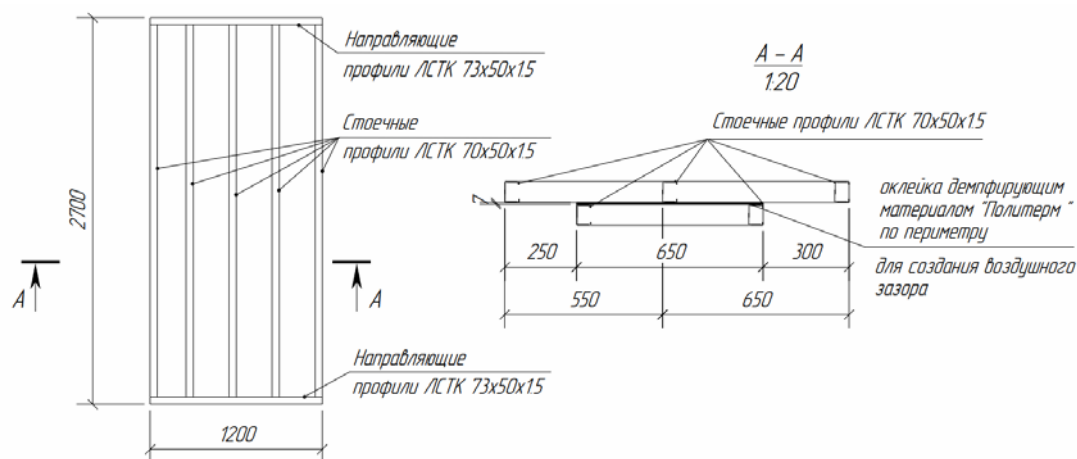


Рис. 1. Каркас перегородки ЛСБК из легких стальных тонкостенных профилей

На основании вышеизложенного была сформулирована цель исследования: исследовать звукоизолирующую способность панелей в целом и перегородок ЛСБК в частности.

Были поставлены следующие задачи:

– экспериментально получить частотную характеристику для четырех видов образцов двухслойной перегородки ЛСБК: с воздушным зазором без облицовки; с облицовкой гипсокартонными листами с одной и двух сторон; с гидроизоляционным разрывом «Техноэласт ХПП» («Технониколь»);

– на основании полученной частотной характеристики качественно оценить влияние различных слоев на звукоизолирующие свойства испытываемых образцов и соответствие представленных образцов стен требованиям нормативных документов по звукоизоляции.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Испытания были проведены на базе испытательной лаборатории ООО «СМП НЕВА».

Испытаниям подверглись следующие образцы (рис. 2).

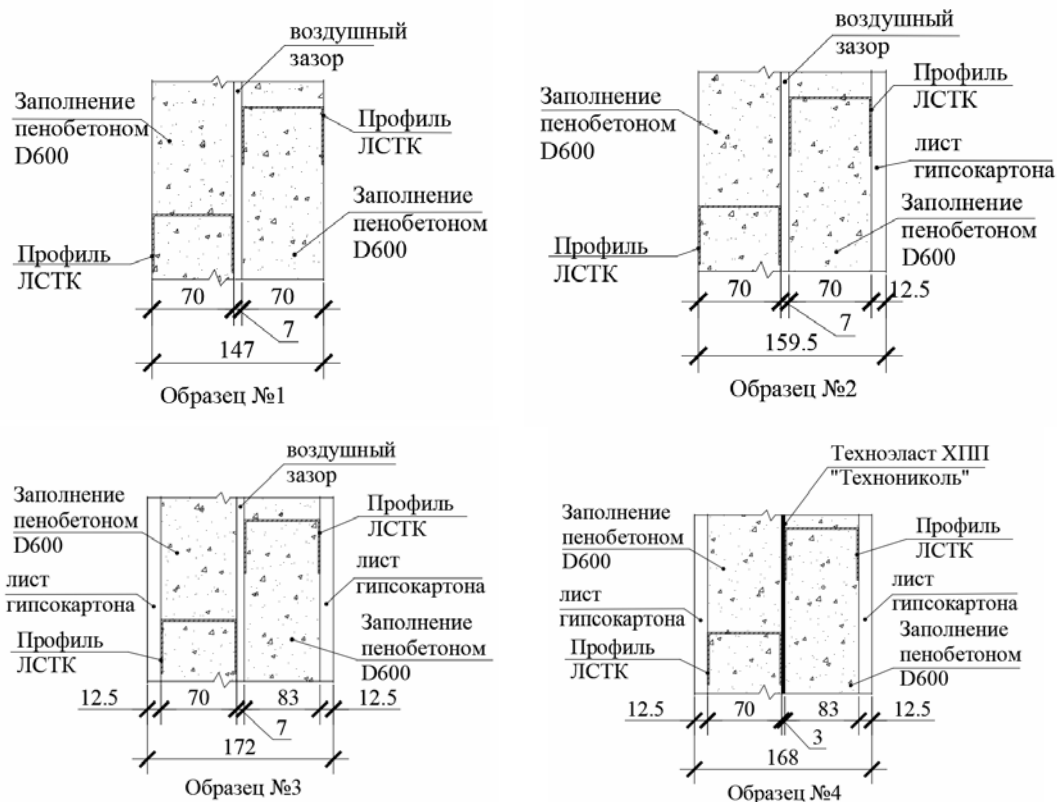


Рис. 2. Образцы, подвергнутые сравнительным испытаниям на звукоизоляцию

Перед испытанием образцы панелей с воздушным зазором были оклеены по контуру зазора демпфирующим материалом (жёлтая окантовка на рис. 3).



Рис. 3. Образцы с воздушным зазором перед испытанием

Методика испытаний описана в а.с. Д.З. Лопашова №159305 (1963 г.). Суть метода заключается в применении двух камер малого размера неправильной формы во встречном расположении относительно друг друга с находящимися в них излучателем звука и

измерительным микрофоном. Испытываемый образец располагается между проемами камер. Измеряемой величиной является разность звуковых давлений  $D$ , дБ, при наличии и отсутствии образца в нормируемом диапазоне частот ИСО 717/1 от 100 до 3150 Гц.

Использованы следующие средства измерения (СИ) и оборудование (ИО):

- установка измерения звукоизоляции малая УИЗ-2М;
- излучатель звука VENTA с генератором шума MR-1;
- прецизионный шумомер-анализатор типа «Алгоритм-03» №028934;
- измеритель параметров микроклимата «Метеоскоп-М» №289118.

Измерения проведем в нормальных климатических условиях в помещении по ГОСТ 8.395-80 «Нормативные условия измерений при поверке»:  $T=(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  и  $W_{\text{отн}}=(50 \pm 5)\%$ .

Расположение образца в акустической камере УИЗ-2М представлено на рис. 4.



Рис. 4. Расположение образца в акустической камере

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерений приведены на рис. 5.



Рис. 5. Результаты измерений

Результаты, полученные при данных испытаниях, соответствуют закону массы при нормальном (перпендикулярном) падении звуковой волны и отвечают зависимости [24]

$$D = 10 \lg \left[ 1 + \left( \frac{\omega m}{2\rho_0 c_0} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где  $m$  – масса образца, кг/м<sup>2</sup>;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота, рад/с,  $\rho_0 c_0$  – импеданс воздуха, Па·с/м (417 Па·с/м).

Также из графиков семейства частотных характеристик разности уровней звуковых давлений в диапазоне частот 100...3150 Гц следует, что по характеру кривых все фрагменты образцов имеют сходную форму изменения звукоизоляции по частотам.

Если условно разделить весь исследуемый частотный диапазон на три части: низкочастотный (100...315 Гц), среднечастотный (351...1250 Гц) и высокочастотный (1250...3150 Гц), то наибольшее значение с точки зрения звукоизоляции имеет среднечастотный диапазон. На его частотах сосредоточены шумы от основных бытовых источников, а значит, на этих частотах нужно применять более эффективные конструкции. К таким конструкциям относится образец №4.

Следует отметить, что так как звуковое поле в установке не соответствует диффузному распространению звуковых волн, как требуется при стандартном методе ревербационных камер по ГОСТ Р ИСО 10140-2-2012, результат измерений не может быть применен для оценки индекса изоляции воздушного шума по нормативным документам. Как правило, значения, полученные на малой установке, выше на 10...15 дБ по сравнению с измерениями по стандартной методике в ревербационных камерах.

Тем не менее, можно приближенно оценить индекс изоляции воздушного шума, используя экспериментально полученную частотную характеристику (рис. 5), по методике СП 23-103-2003. Оценочные значения индекса звукоизоляции воздушного шума  $R_w$  представлены в таблице.

Сравнение оценочных значений индекса звукоизоляции воздушного шума образцов с нормируемыми СП 23-103-2003

№ п/п	Состав образца	$R_w$ , дБ	Требуемое значение $R_w$ , дБ				
			Перегородки между комнатами при категории помещения:		Стены и перегородки между квартирами, при категории помещения:		
			А	Б и В	А	Б	В
1	Образец №1	49	43	41	54	52	50
2	Образец №2	52					
3	Образец №3	53					
4	Образец №4	55					

Из таблицы видно, что образцы удовлетворяют требованиям по звукоизоляции для перегородок между комнатами для всех категорий помещений, образцы 2 и 3 – для перегородок между квартирами для помещений с комфортными условиями, образец 4 – для перегородок между квартирами для помещений с высококомфортными условиями. Применение гидроизоляции «Техноэласт ХПП» позволяет незначительно увеличить индекс звукоизоляции. Следует подчеркнуть, что рассчитанные значения звукоизоляции не являются точными, а носят оценочный характер вследствие того, что испытательная установка не соответствует требованиям для ревербационных камер по ГОСТ Р ИСО 10140-2-2012.

На основании полученных в результате проведенного испытания данных можно с уверенностью сделать выводы только о сравнительных характеристиках образцов. Так, дополнение базового образца конструкции из панелей ЛСБК (образец №1) гипсокартонными листами в один слой с обеих сторон, а также внесение гидрозву-



коизолирующей прокладки между слоями из материала «Техноэласт ХПП» можно незначительно увеличить общую звукоизолирующую способность конструкции.

Наибольший вклад в улучшение звукоизоляционных свойств внес первый слой ГКЛ (образец №2); второй слой ГКЛ, установленный с другой стороны конструкции (образец №3), дополнительно повысил эффективность и скомпенсировал провалы в области резонансной частоты и в высокочастотной области. Внесение мембранного материала в качестве разделяющего слоя между панелями ЛСБК (образец №4) увеличило эффективность конструкции в частотном диапазоне 630–1000 Гц несущественно (на контрольной частоте 500 Гц).

### ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования были сделаны следующие выводы:

1. Показано, что по характеру кривых все фрагменты образцов имеют сходную форму изменения звукоизоляции по частотам. Наименьшей звукоизолирующей способностью образцы обладают на частоте 315 Гц, наибольшей – на частоте 630 Гц.

2. Показано, что дополнением базового образца конструкции из панелей ЛСБК в 2 слоя облицовкой листами из ГКЛ, а также внесением гидрозвукоизолирующей прокладки между слоями из материала «Техноэласт ХПП» можно незначительно увеличить общую звукоизолирующую способность конструкции.

3. Показано, что наибольшее повышение уровня звукоизоляции обеспечил первый слой ГКЛ; второй слой ГКЛ, установленный с другой стороны конструкции, дополнительно повысил эффективность и скомпенсировал провалы в высокочастотной области.

4. Показано, что панель ЛСБК двухслойная с воздушным разрывом с дополнительной облицовкой как с одной, так и с двух сторон листами ГКЛ 12,5 мм в один слой полностью удовлетворяют нормативным требованиям по звукоизоляции для перегородок между квартирами для помещений с комфортными условиями.

5. Показано, что панель ЛСБК двухслойная с гидроразрывом разрывом «Техноэласт ХПП» с дополнительной облицовкой с двух сторон листами ГКЛ 12,5 мм в один слой полностью удовлетворяют нормативным требованиям по звукоизоляции для перегородок между квартирами для помещений с высококомфортными условиями.

6. Предложено использовать двухслойные панели ЛСБК с толщиной слоя 70 мм, плотностью пенобетона  $600 \text{ кг/м}^3$ , с воздушным зазором между слоями 7 мм, с обшивкой с двух сторон гипсокартонными листами 12,5 мм в один слой в жилищном строительстве в качестве перегородок между квартирами для помещений с комфортными условиями, аналогичные панели с гидроразрывом «Техноэласт ХПП» – в качестве перегородок между квартирами для помещений с высококомфортными условиями.

7. Результаты испытаний внедрены в деятельность ООО «Совби».

Особенности влияния на развязку каркасов панелей ЛСБК материалов прокладок, а также эффективность мембранного материала в конструкции могут показать только испытания на крупном фрагменте стены. Данные испытания являются оценочными и не дают возможности точной оценки звукоизоляции конструкции.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают благодарность научно-испытательной лаборатории «СМП НЕВА» в лице руководителя Пестрякова Игоря Ивановича за помощь в организации и проведении экспериментального исследования.

### Список литературы

1. Cremer, L. Die Wissen Schaftlichen Grundlagen Der Raumakustik. Band III. Wellentheorie Raumakustik / L. Cremer. – Leipzig, 1950. – 355 p.
2. Клюкин, И.Н. Борьба с шумом и звуковой вибрацией на судах / И.Н. Клюкин. – Ленинград: Судостроение, 1971. – 416 с.

3. Заборов, В.И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций / В.И. Заборов. – Москва: Изд-во литературы по строительству, 1969. – 186 с.
4. Боголепов, И.И. Акустический расчет системы вентиляции и кондиционирования в современных зданиях / И.И. Боголепов, А.А. Гладких. – DOI 10.18720/МСЕ.7.3 // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – №5. – С.30–42.
5. Боголепов, И.И. Влияние акустических отверстий на звукоизоляцию строительных конструкций / И.И. Боголепов // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – №1. – С.17–21.
6. Пестряков, И.И. Звукоизоляционная характеристика вспененного полипропилена на примере виброшумоизоляционного материала пенотерм RenoProf НПП ЛЭ / И.И. Пестряков, О.П. Шабалова, Д.В. Семененко, Е.Н. Гонякина, И.А. Смирнов, А.В. Корсун. – DOI 10.18720/CUBS.41.6 // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 2(41). – С. 78–90.
7. Салтыков, И.П. Теоретическое и практическое исследование звукоизоляции легких ограждающих конструкций с использованием метода “сосредоточенных параметров” / И.П. Салтыков. – DOI 10.54734/20722958\_2023\_2\_85 // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – №.2. – С. 85–95.
8. Седов, М.С. Звукоизоляция конструкций зданий: сборник статей / М.С. Седов; под редакцией доктора технических наук М.С. Седова. – Горький, 1974. – 82 с.
9. Бобылев, В.Н. О влиянии угла падения звука на звукоизоляцию светопрозрачных ограждений / В.Н. Бобылев, В.А. Тишков, Д.Л. Щеголев, М.М. Петрова // Приволжский научный журнал. – 2019. – №. 4(52). – С.23–30.
10. Ерофеев, В.И. Резервы повышения звукоизоляции однослойных и многослойных ограждающих конструкций зданий / В.И. Ерофеев, Д.В. Монич. – DOI 10.31675/1607-1859-2020-22-5-98-110 // Вестник томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2020. – Т.22, № 5. – С. 98–110.
11. Гребнев, П.А. Теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляции бескаркасных ограждающих конструкций из сэндвич-панелей / П.А. Гребнев // Вестник томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 2(49). – С. 109–118.
12. Боголепов, И.И. Увеличение звукоизоляции двустенных конструкций за счет применения звукоизолирующих мостиков / И.И. Боголепов // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – №.2. – С. 46–53.
13. Окунева, Г.А. Исследование звукоизолирующих свойств строительных материалов и конструкций на основе пеностекла / Г.А. Окунева, В.Ю. Радоуцкий, В.Г. Шаптала // Вестник БГТУ Им. В.Г. Шухова. – 2008. – №4. – С. 45–48.
14. Радоуцкий, В.Ю. Теоретические и экспериментальные исследования звукоизолирующей способности теплоизоляционных плит на основе пеностекла / В.Ю. Радоуцкий, Ю.В. Ветрова // Вестник БГТУ Им. Шухова. – 2015. – №5. – С. 45–48.
15. Пашенко, Ю.О. Исследование звукоизоляции конструкций из ограждающих блоков / Ю.О. Пашенко, М.И. Марченко, О.А. Сотникова // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2022. – №.3 (41). – С. 5–10.
16. Lin, C. Revealing the Sound Insulation Capacities of TPMS Sandwich Panels / C. Lin, G. Wen, H. Yin, Z.-P. Wang, J. Liu, Y.M. Xie. – DOI 10.1016/j.jsv.2022.117303 // Journal of Sound and Vibration. – 2022. – 540. – P.117303.
17. Wen-chao, H. Sound Insulation Improvement Using Honeycomb Sandwich Panels / H. Wen-chao, N. Chung-fai. – DOI 10.1016/S0003-682X(97)00033-9 // Applied Acoustics. – 1998. – 53. – P. 163–177.
18. Song, Y. Vibration and Sound Properties of Metamaterial Sandwich Panels with Periodically Attached Resonators: Simulation and Experiment Study / Y. Song, J. Wen, H. Tian, X. Lu, Z. Li, L. Feng. – DOI 10.1016/j.jsv.2020.115644 // Journal of Sound and Vibration. – 2020. – 489. – P.115644.
19. Huang, W. Research Progress of Terahertz Wave Dynamic Control of Digital Coded Metasurfaces / W. Huang, C. Li, B. Fang, J. Xu, F. Liu, L. Xu, Y. Tang, Z. Hong, X. Jing. –

DOI 10.1016/j.optlaseng.2023.107977 // Optics and Lasers in Engineering. – 2024. – 174. – Art.No. 107977.

20. Hemmatian, M. a Sound Transmission Analysis of MR Fluid Based-Circular Sandwich Panels: Experimental and Finite Element Analysis / M. Hemmatian and R. Sedaghati. – DOI 10.1016/j.jsv.2017.07.009 // Journal of Sound and Vibration. – 2017. – 408. – P.43–59.

21. Yang, X. Sound Insulation Performance of Structural Wood Wall Integrated with Wood Plastic Composite / X. Yang, X. Tang, L. Ma and Y. Sun. – DOI 10.21967/jbb.v4i2.215 // Journal of Bioresources and Bioproducts. – 2019. – 4. – P. 111–118.

22. Гарькина, И.А. Опыт проектирования композитов: ретроспективный анализ / И.А. Гарькина, А.М. Данилов. – DOI 10.54734/20722958\_2024\_2\_22// Региональная архитектура и строительство. – 2024. – №2(59). – С. 22–29.

23. Будылина, Е.А. Формирование свойств композитов: от эмпирического подхода к фундаментализации / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов. – DOI 10.54734/20722958\_2024\_1\_33 // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – №1(58). – С. 33–39.

24. Старцева, О.В. Теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляции перегородок / О.В. Старцева, С.Н. Овсянников // Вестник ТГАСУ. – 2013. – № 2. – С.176–184.

### References

1. Cremer, L. Die Wissen Schaftlichen Grundlagen Der Raumakustik. Band III. Wellentheorie Raumakustik / L. Cremer. – Leipzig, 1950. – 355 p.

2. Klyukin I.N. Combating noise and sound vibration on ships / I.N. Klyukin. – Leningrad: Shipbuilding, 1971. – 416 p.

3. Zaborov, V.I. Theory of sound insulation of enclosing structures / V.I. Zaborov. – Moscow: Building Literature Publishing, 1969. – 186 p.

4. Bogolepov, I.I. Acoustic calculation of ventilation and air conditioning systems in modern buildings / I.I. Bogolepov, A.A. Gladkikh. – DOI 10.18720/MCE.7.3 // Magazine of Civil Engineering. – 2009. – №5 – P. 30–42.

5. Bogolepov, I.I. The effect of acoustic openings on the sound insulation of building structures / I.I. Bogolepov. – DOI 10.18720/MCE.3.3 // Magazine of Civil Engineering. – 2009. – №.1. – P.17–21.

6. Pestryakov, I.I. Sound insulation characteristics of foamed polypropylene on the example of vibration and noise insulation material Penoprof NPP LE / I.I. Pestryakov, O.P. Shabanova, D.V. Semenenko, E.N. Konyakina, I.A. Smirnov, A.V. Korsun. – DOI 10.18720/CUBS.41.6 // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2016. – № 2(41). – P. 19811.

7. Saltykov, I.P. Theoretical and practical research of sound insulation of light enclosing structures using the method of «concentrated parameters» / I.P. Saltykov. – DOI 10.54734/20722958\_2023\_2\_85 // Regional architecture and engineering. – 2023. – № 2. – P. 85–95.

8. Sedov, M.S. Sound insulation of building structures: collection of articles / M.S. Sedov; edited by Ph.D.M.S. Sedov. – Gorky, 1974. – 82 p.

9. Bobylev, V.N. On the influence of the angle of incidence of sound on the sound insulation of translucent walling / V.N. Bobylev, V.A. Tishkov, D.L. Shchegolev // Privolzhsky scientific journal. – 2019. – №. 4(52). – P.23–30.

10. Erofeev, V.I. Improvement potential for sound insulation of single- and multilayer wall panels / V.I. Erofeev, D.V. Monich. – DOI 10.31675/1607-1859-2020-22-5-98-110 // Journal of Construction and Architecture. – 2020. – Vol.22, № 5. – P. 98–110.

11. Grebnev, P.A. Theoretical and experimental studies of insulating properties of frameless sandwich wall panels / P.A. Grebnev // Journal of Construction and Architecture. – 2015. – № 2(49). – P. 109–118.

12. Bogolepov, I.I. Increasing the sound insulation of double-walled structures by the use of soundproof bridges / I.I. Bogolepov // Magazine of Civil Engineering. – 2009. – №2. – P. 46–53.
13. Radoutsky, V.Yu. Theoretical and experimental studies of the sound-insulating ability of thermal insulation slabs based on foam glass / V.Yu. Radoutsky, Yu.V. Vetrova // The Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2008. – №5. – P. 45–48.
14. Radoutsky, V.Yu. Theoretical and experimental studies of the sound-insulating ability of thermal insulation slabs based on foam glass / V.Yu. Radoutsky, Yu.V. Vetrova // The Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2015. – №5. – P. 45–48.
15. Pashchenko, Yu.O. Study of sound insulation of enclosing structures made of wall blocks / Yu.O. Pashchenko, M.I. Marchenko, O.A. Sotnikova // Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region. – 2022. – No.3 (41). – P. 5–10.
16. Lin, C. Revealing the Sound Insulation Capacities of TPMS Sandwich Panels / C. Lin, G. Wen, H. Yin, Z.-P. Wang, J. Liu, Y.M. Xie. – DOI 10.1016/j.jsv.2022.117303 // Journal of Sound and Vibration. – 2022. – 540. – P.117303.
17. Wen-chao, H. Sound Insulation Improvement Using Honeycomb Sandwich Panels / H. Wen-chao, N. Chung-fai. – DOI 10.1016/S0003-682X(97)00033-9 // Applied Acoustics. – 1998. – 53. – P. 163–177.
18. Song, Y. Vibration and Sound Properties of Metamaterial Sandwich Panels with Periodically Attached Resonators: Simulation and Experiment Study / Y. Song, J. Wen, H. Tian, X. Lu, Z. Li, L. Feng. – DOI 10.1016/j.jsv.2020.115644 // Journal of Sound and Vibration. – 2020. – 489. – P.115644.
19. Huang, W. Research Progress of Terahertz Wave Dynamic Control of Digital Coded Metasurfaces / W. Huang, C. Li, B. Fang, J. Xu, F. Liu, L. Xu, Y. Tang, Z. Hong, X. Jing. – DOI 10.1016/j.optlaseng.2023.107977 // Optics and Lasers in Engineering. – 2024. – 174. – Art.No. 107977.
20. Hemmatian, M. a Sound Transmission Analysis of MR Fluid Based-Circular Sandwich Panels: Experimental and Finite Element Analysis / M. Hemmatian and R. Sedaghati. – DOI 10.1016/j.jsv.2017.07.009 // Journal of Sound and Vibration. – 2017. – 408. – P.43–59.
21. Yang, X. Sound Insulation Performance of Structural Wood Wall Integrated with Wood Plastic Composite / X. Yang, X. Tang, L. Ma and Y. Sun. – DOI 10.21967/jbb.v4i2.215 // Journal of Bioresources and Bioproducts. – 2019. – 4. – P. 111–118.
22. Garkina, I.A. Experience in Composites Design: retrospective analysis / I.A. Garkina, A.M. Danilov. – DOI 10.54734/20722958\_2024\_2\_22 // Regional architecture and engineering. – 2024. – №2(59). – P. 22–29.
23. Budylna, E.A. Formation of Composite Properties: from Empirical Approach to Fundamentalization / E.A. Budylna, I.A. Garkina, A.M. Danilov. – DOI 10.54734/20722958\_2024\_1\_33 // Regional architecture and engineering. – 2024. – №1(58). – P. 33–39.
24. Startseva, O.V. Theoretical and experimental researches of sound insulation of partitions / O.V. Startseva, S.N. Ovsyannikov // Journal of Construction and Architecture. – 2013. – № 2. – P.176–184.

*Полоцкий государственный университет  
имени Евфросинии Полоцкой*

Республика Беларусь, 211440,  
г.Новополоцк, ул. Блохина, д. 29,  
тел.(факс) (8214)50-57-48

**Лазовский Дмитрий Николаевич,**  
доктор технических наук, профессор  
E-mail: d.lazovski@psu.by

*Брестский государственный технический  
университет*

Республика Беларусь, 224017, г.Брест,  
ул. Московская, д. 267,  
тел.(факс) (8016)232-17-27

**Тур Виктор Владимирович,**  
доктор технических наук, профессор  
E-mail: tur.s320@mail.ru

*ООО «Sotera»*

Australia, 4000, Spring Hill, Level 11,  
378/225 Wickham Terrace,  
тел: +61 75562 0022

**Лазовский Андрей Дмитриевич,**  
кандидат технических наук  
E-mail: andrei.lazowski@sotera.com.au

*Euphrosyne Polotskaya State University  
of Polotsk*

Republik of Belarus, 211440,  
Novopolotsk, 29, Blohina St.,  
tel.(fax): (8214)50-57-48

**Lazouski Dzmitry Mikalaeovich,**  
Doctor of Sciences, Professor  
E-mail: d.lazovski@psu.by

*Brest state technical university*

Republik of Belarus, 224017,  
Brest, 267, Moskovskaja St.,  
tel.(fax): (8016)232-17-57

**Tur Viktor Uladzimiravich,**  
Doctor of Sciences, Professor  
E-mail: tur.s320@mail.ru

*Sotera Pty Ltd*

Australia, 4000, Spring Hill, Level 11,  
378/225 Wickham Terrace,  
tel: +61 75562 0022

**Lazouski Andrei Dzmitryevich,**  
Candidate of Sciences  
E-mail: andrei.lazowski@sotera.com.au

## ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО ПРИЖАТИЯ НА РАБОТУ СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МНОГОПУСТОТНЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ В ПЛАТФОРМЕННЫХ СТЫКАХ СО СТЕНАМИ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ

Д.Н. Лазовский, В.В. Тур, А.Д. Лазовский

Представлены результаты экспериментально-теоретического исследования влияния давления поперечного прижатия на работу в предельной стадии перед разрушением многопустотных плит перекрытий безопалубочного формования в платформенных стыках со стенами многоэтажных зданий. Установлены стадии работы под нагрузкой плит перекрытий при их защемлении в платформенном стыке и влияние величины давления прижатия на схему их разрушения.

*Ключевые слова: платформенный стык, давление поперечного прижатия, многопустотные плиты перекрытий безопалубочного формования, схема разрушения*

## INFLUENCE OF TRANSVERSE PRESSION ON THE PERFORMANCE OF PRECAST CONCRETE HOLLOW CORE SLABS IN PLATFORM JOINTS WITH THE WALLS OF MULTI-STORY BUILDINGS

D.N. Lazouski, V.V. Tur, A.D. Lazouski

The results of an experimental and theoretical study of the influence of transverse compression pressure on the work at the limiting stage before destruction of hollow-core floor slabs of formless molding at platform joints with the walls of multi-story buildings are presented. The stages of operation under the load of floor slabs when they are pinched in a platform joint and the influence of the magnitude of the pressing pressure on the pattern of their destruction have been established.

*Keywords: platform joint, transverse pressing pressure, hollow-core floor slabs without formwork, destruction scheme*

**Введение.** В последнее время, несмотря на появление новых работ в области сопротивления при сжатии платформенных стыков плит перекрытий со стенами многоэтажных зданий [1–7], недостаточно полно исследовано напряженно-деформированное состояние многопустотных плит перекрытий при изгибе в месте их заземления при опирании на стены (при появлении т.н. непреднамеренного заземления). Кроме того, в получивших широкое применение многопустотных предварительно напряженных плитах перекрытий безопалубочного формования на длинных стенах исключены местное продольное армирование верхней полки в виде сеток, установка поперечной арматуры, строповочных петель, других закладных деталей, как это предусматривает агрегатно-поточная технология их изготовления. Плиты безопалубочного формования армированы в нижней и верхней зонах продольной напрягаемой арматурой в виде высокопрочной проволоки или канатов.

Особенностью работы плит перекрытий в составе платформенных стыков является появление в местах опирания изгибающих моментов, величина которых зависит от степени их заземления (поперечного прижатия) и конструктивного армирования при их работе на изгиб. Появление трещин нормального отрыва в месте платформенного стыка в многопустотных плитах безопалубочного формования без поперечного армирования свидетельствует об опасности разрушения от среза [1, 8]. При изгибе после образования трещины нормального отрыва в месте платформенного стыка от действия опорного изгибающего момента верхняя предварительно напряженная арматура работает с пониженным сопротивлением, так как минимальная длина площадки опирания в плитах безопалубочного формования равна 80...120 мм, а расчетная длина зоны передачи напряжений для арматурных канатов и высокопрочной проволоки равна соответственно 500 мм и 330 мм (в зависимости от диаметра напрягаемого элемента) [9–12]. При этом величина поперечного прижатия опорной зоны плит перекрытий в составе платформенных стыков варьируется в широких пределах в зависимости от этажа многоэтажного здания.

Целью настоящего исследования является установление влияния величины поперечного прижатия на работу при изгибе железобетонных многопустотных плит перекрытий безопалубочного формования в платформенных стыках со стенами многоэтажных зданий.

Для достижения поставленной цели было предусмотрено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния плит перекрытий в составе платформенного стыка и испытание в натуральную величину многопустотных плит перекрытий с варьированием величины поперечного прижатия в платформенном стыке.

**Моделирование работы платформенных стыков.** Для получения картины распределения нормальных напряжений в многопустотной плите при действии поперечного прижатия использовалась плоская конечно-элементная модель платформенного стыка, созданная в ПК SCAD (рис. 1), а для учета влияния контактных соединений на перераспределение усилий в многопустотных панелях перекрытия и стеновых панелях – объемная модель в программе ANSYS (рис. 2).



Рис. 1. Распределение нормальных напряжений в зоне платформенного стыка при действии вертикального прижатия стеновой панели

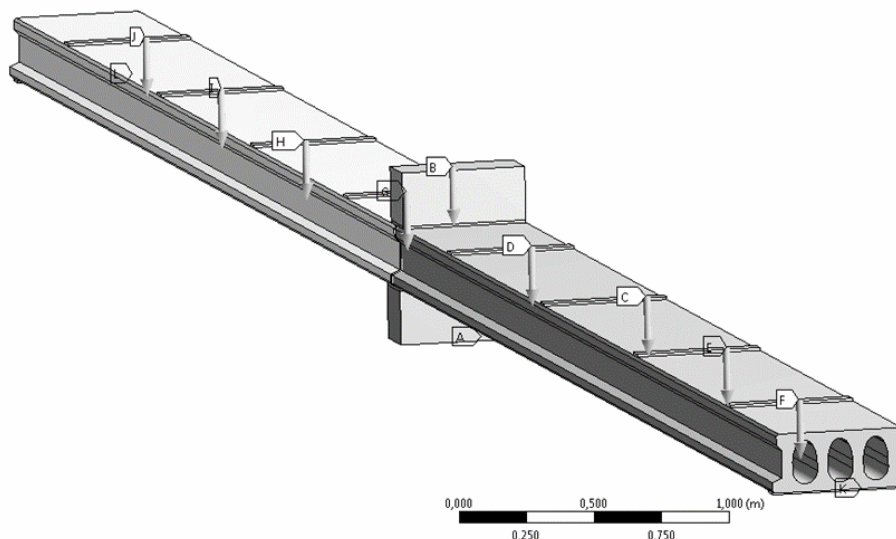


Рис. 2. Объемная модель плит перекрытий с платформенным стыком

В результате компьютерного моделирования установлено наличие поперечного давления в зонах анкеровки верхней и нижней предварительно напряженной арматуры плит в платформенном стыке (см. рис. 1), что должно положительно сказаться на их сопротивлении в расчетном поперечном сечении после образования трещин нормального отрыва от действия опорного изгибающего момента. При объемном моделировании варьировали толщину и прочность горизонтальных швов, наличие вертикального шва и усилие поперечного прижатия от верхних этажей. В результате была получена схема разрушения плит от действия опорного изгибающего момента при их защемлении в платформенном стыке (рис. 3).

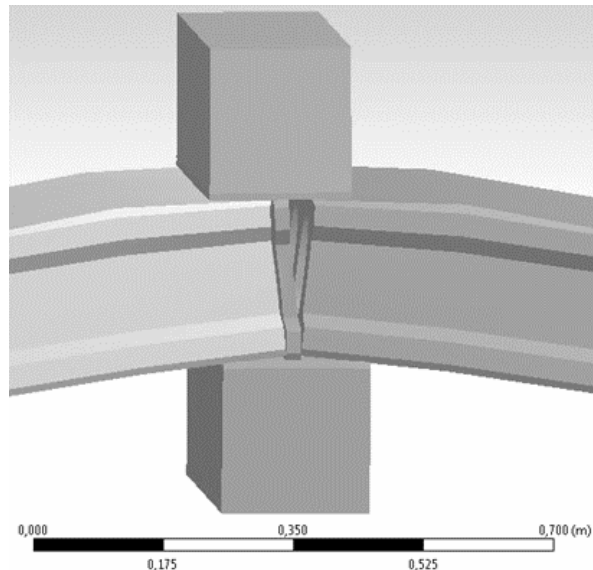


Рис. 3. Схема разрушения многопустотных плит в платформенном стыке

**Экспериментальные исследования.** Для получения экспериментальных данных степени защемления многопустотных плит перекрытий в платформенном стыке и влияния поперечного прижатия в нем на характер их разрушения были испытаны до разрушения два фрагмента перекрытия в составе платформенных стыков.

Многопустотные предварительно напряженные плиты безопалубочного формирования имели длину 5980 мм и были армированы высокопрочной проволокой диаметром 5 мм [9, 13], одним концом опирались на вертикальные элементы в платформенном стыке (моделирующие несущие стены), а другим концом – на стальные плас-

тины с динамометрами. Горизонтальные толщиной 10 мм и вертикальный шириной 20 мм швы выполнялись цементно-песчаным раствором марки М50.

В экспериментальном исследовании варьировалась величина вертикального прижатия плит в платформенном стыке, имитирующая нагрузку от вышерасположенных этажей здания. Было принято два значения вертикального прижатия, которые характеризовали минимальное (0,3 МПа) и максимальное (2 МПа) давление прижатия стыка, характерное соответственно для верхних и нижних этажей многоэтажных зданий.

Нагружение железобетонного перекрытия из многопустотных плит безопалубочного формования с платформенным стыком на смежной опоре проводилось по неразрезной балочной схеме. Нагрузка прикладывалась автоматической насосной станцией (для поддержания заданного усилия) с помощью гидравлических домкратов. Она прикладывалась сосредоточенно: в пролетах – в четырех местах каждой плиты, на смежной опоре – одним домкратом через бетонный фрагмент, имитирующий верхний участок стены. Общий вид испытания представлен на рис. 4.



Рис. 4. Общий вид испытания многопустотных плит перекрытий с платформенным стыком на промежуточной опоре

У фрагмента перекрытия ПФ-1 с давлением вертикального прижатия 0,3 МПа происходило скалывание верхнего ребра плит при их повороте от действия пары сил (рис. 5). В процессе испытания автоматической насосной станцией давление вертикального прижатия поддерживалось на заданном уровне.

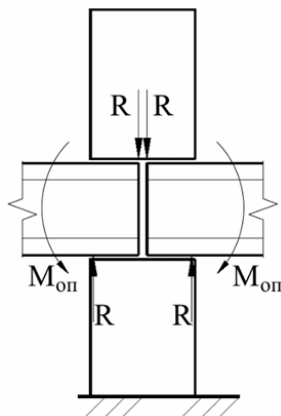


Рис. 5. Схема внутренних усилий в плитах перекрытий в зоне платформенного стыка

Следует отметить, что из-за более высокой прочности бетона верхнего фрагмента стеновой панели ее раскалывание по направлению действия вертикальных усилий, передающихся от торцевых ребер плит при их повороте под нагрузкой, не происходило, как это наблюдалось в случае кирпичных стен в испытаниях [1]. При дальнейшем нагружении после скалывания торцевых ребер плит величины опорных реакций на свободных опорах и сопоставление их с пролетной нагрузкой свидетельствуют о наличии отрицательного изгибающего момента в плитах в зоне платформенного стыка вплоть до разрушения (рис. 6).



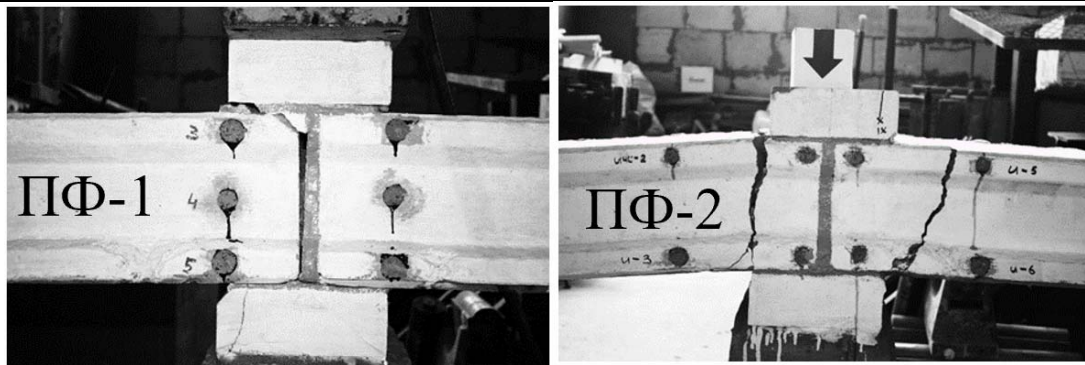


Рис. 6. Общий вид платформенных стыков фрагментов ПФ-1 и ПФ-2 после испытаний

У фрагмента перекрытия ПФ-2 с более высоким давлением вертикального прижатия (2 МПа) усилия прижатия от верхнего фрагмента стеновой панели и вертикальной опорной реакции от плиты распределялись равномерно по ее площадке опирания на нижний фрагмент стеновой панели.

В процессе увеличения нагрузки вблизи грани опоры в многопустотных плитах появлялись трещины нормального отрыва, которые оставались единственными вблизи платформенного стыка вплоть до разрушения (см. рис. 6). После возникновения трещин нормального отрыва в зоне платформенного стыка ПФ-2 при дальнейшем нагружении вплоть до разрушения в многопустотных плитах измеренные реакции на свободных опорах, также как и у фрагмента перекрытия ПФ-1, были меньше, чем предполагало свободное опирание плит на опорах (разрезная схема), что свидетельствовало о наличии отрицательного изгибающего момента.

Учитывая большое раскрытие трещин нормального отрыва по граням опоры (в среднем 16 мм) и глубину их распространения по высоте поперечного сечения плит, отмечаем, что в работе по восприятию опорного изгибающего момента кроме верхней арматуры принимает участие и нижняя арматура, которую пересекает трещина нормального отрыва (рис. 7). При этом раскрытие критических трещин происходит в результате выдергивания проволочной арматуры из бетона концевых участков плит, заземленных в платформенном стыке, а также взаимного смещения арматуры и бетонного блока с другой стороны трещин. Степень участия нижней арматуры в работе на растяжение определяется раскрытием трещин нормального отрыва на уровне ее центра тяжести.

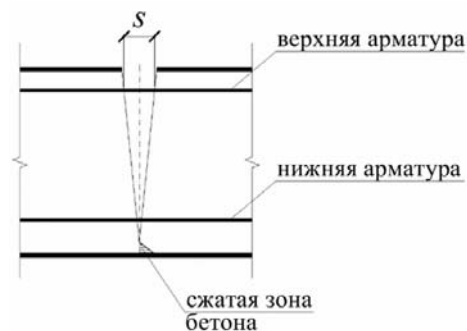


Рис. 7. Схема работы на растяжение верхней и нижней арматуры плит в зоне действия опорных изгибающих моментов

Экспериментальные зависимости «изгибающий момент – угол поворота» свидетельствуют о наличии двух стадий работы платформенного стыка: I – до скалывания углов плит и нижних стеновых панелей (ПФ-1), а также до образования критических трещин нормального отрыва по грани опоры (ПФ-2), для которой характерно упругое деформирование в виде поворота плит вблизи платформенных стыков; II – после скалывания углов плит и стеновых панелей (ПФ-1) и после образования критических трещин нормального отрыва по грани опоры (ПФ-2), в которой наблюдается увели-

чение угла поворота при незначительном увеличении опорного момента (пластическое деформирование в виде поворота плит) (рис. 8).

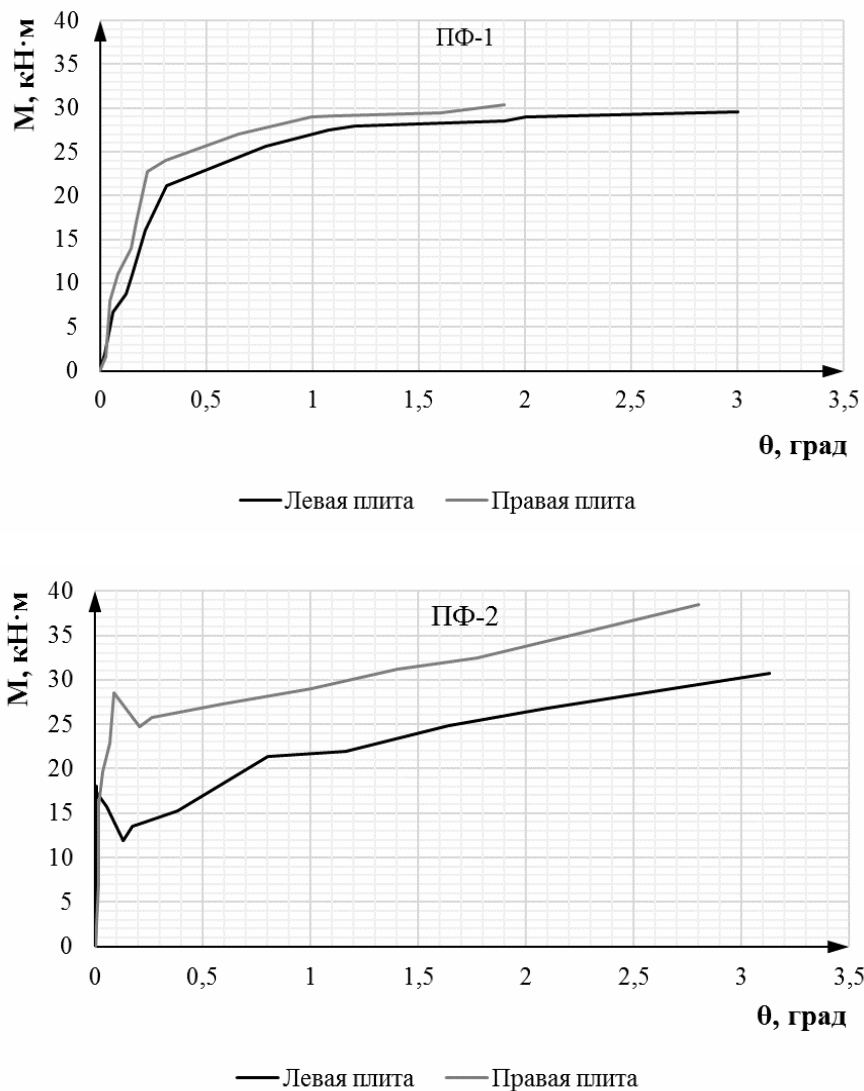


Рис. 8. Графики зависимостей «изгибающий момент – угол поворота» для платформенных стыков ПФ-1 и ПФ-2

Распределение изгибающих моментов по длине плит фрагментов ПФ-1 и ПФ-2 свидетельствует о частичном защемлении плит перекрытия в платформенном стыке (рис. 9).

Следует отметить, что величина давления вертикального прижатия изменяет характер разрушения плит в зоне платформенного стыка, но незначительно сказывается на степени их защемления (опорном изгибающем моменте в сравнении с жесткой заделкой  $M_{\text{exp}}/M_{\text{жест}}$ ): ПФ-1  $30/45,8=0,66$ ; ПФ-2  $34,56/45,8=0,75$ . При этом поперечное прижатие зоны анкеровки верхней и нижней предварительно напряженной арматуры плит перекрытий увеличивает ее сопротивление в критической трещине нормального отрыва [13, 14]. Это положительно влияет на оценку живучести перекрытий многоэтажных зданий.

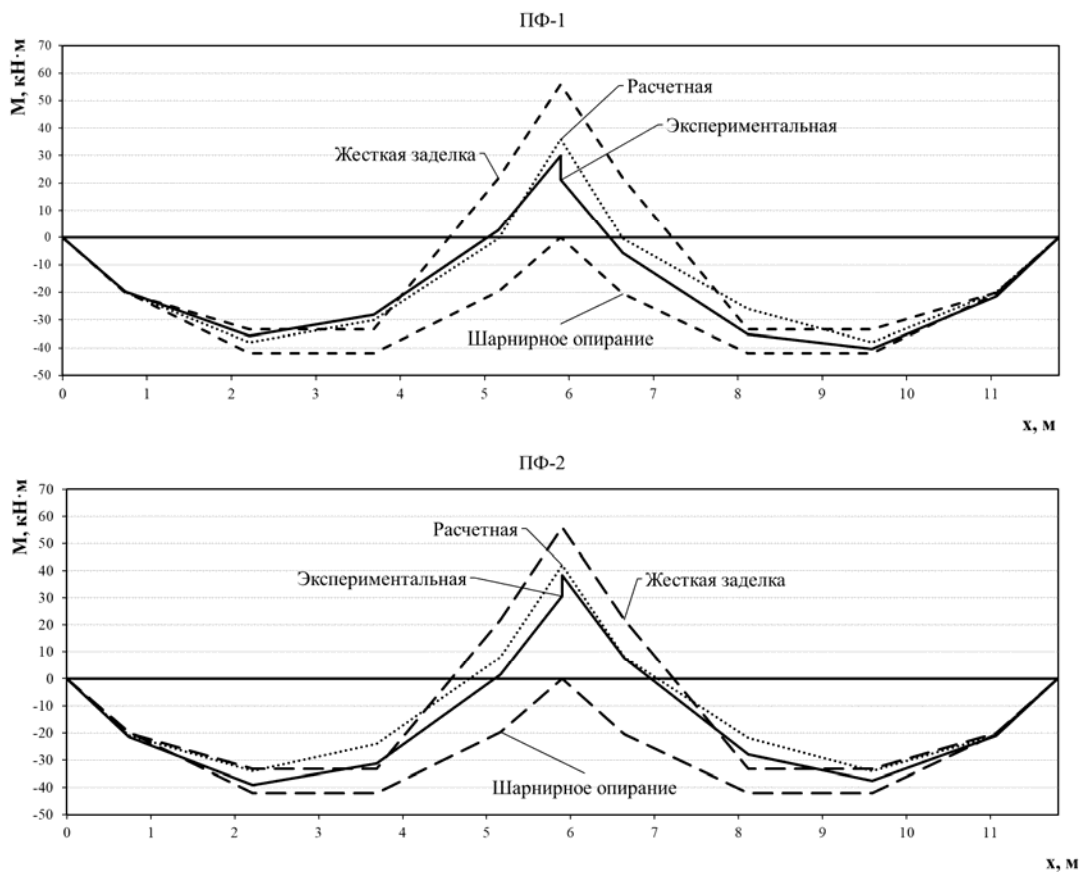


Рис. 9. Распределение изгибающих моментов в плитах перекрытий фрагментов ПФ-1 и ПФ-2

**Выводы.** Характер разрушения при изгибе сборных предварительно напряженных многопустотных плит безопалубочного формования с платформенными стыками многоэтажных зданий подтверждает его зависимость от величины давления вертикального прижатия.

Поперечное давление прижатия в зонах анкерки верхней и нижней предварительно напряженной арматуры плит в платформенном стыке повышает их сопротивление в расчетном поперечном сечении после образования трещин нормального отрыва при действии опорного изгибающего момента.

Экспериментально установлены две стадии работы плит перекрытий в зоне платформенного стыка: упругая и пластическая при отсутствии признаков хрупкого разрушения от среза и потери анкерки предварительно напряженной арматуры многопустотных плит безопалубочного формования.

#### Список литературы

1. Крамарь, В.Г. Прочность узлов сопряжения преднапряженных многопустотных панелей перекрытий со стенами / В.Г. Крамарь, А.Я. Эпп, К.М. Арзумян, Н.А. Панков // The Ninth International Congress Of The FIP. – Москва, 1982. – 19 с.
2. Ключева, Н.В. Жилые и общественные здания из железобетонных панельно-рамных элементов индустриального производства / Н.В. Ключева, В.И. Колчунов, Д.А. Рыпаков, А.С. Бухтиярова // Жилищное строительство. – 2015. – №5. – С.69–75.
3. Савин, С.Ю. Анализ живучести сборно-монолитных каркасов многоэтажных зданий из железобетонных панельно-рамных элементов при аварийных воздействиях, вызванных потерей устойчивости одной из колонн / С.Ю. Савин, Н.В. Федорова, С.Г. Емельянов // Жилищное строительство. – 2018. – № 12. – С. 3–7.
4. Колчунов, В.И. Прочность и деформативность сборно-монолитных платформенных стыков панельных зданий / В.И. Колчунов, Д.В. Мартыненко. –

DOI 10.33979/2073-7416-2019-82-2-26-34 // Строительство и реконструкция. – 2019. – № 2(82). – С. 26–34.

5. Колчунов, В.И. Деформирование и трещинообразование конструкции платформенного стыка в сборно-монолитном каркасе здания / В.И. Колчунов, Д.В. Мартыненко. – DOI 10.33979/2073-7416-2020-90-4-38-47 // Строительство и реконструкция. – 2020. – № 4(90). – С. 38–47.

6. Патент ВУ 10938 МПК E04B1/61. Платформенный сборно-монолитный стык / Тур В.В., Лазовский А.Д. (ВУ); Полоцкий государственный университет. – Номер заявки u20150295; Заявл. 21.08.2015; Опубл. 21.0.2015.

7. Патент 2589779 Российская Федерация, МПК E04B 1/38. Платформенный сборно-монолитный стык / Колчунов В.И., Ключева Н.В., Филатова С.А., Мартыненко Д.В., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Юго-Западный Государственный Университет». – №2015113471/03 заявл. 13.04.2015; опубл. 10.07.2016, Бюл. №19. – 7 с.

8. Амгалан, Э. Прочность опорных зон многопустотных плит перекрытий, изготовленных по резательной технологии, в платформенных стыках крупнопанельных зданий / Э. Амгалан // Дни студенческой науки: сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов института строительства и архитектуры НИУ МГСУ (Москва, 02–05 марта 2020 года). – Москва: Издательство МИСИ – МГСУ, 2020. – С. 332–334.

9. Плиты железобетонные многопустотные предварительно напряженные безопасного формования на оборудовании «Вибропресс» (Россия) для перекрытий и покрытий жилых, общественных и производственных зданий: Серия Б1.041.1-5.10 / Ин-т НИПТИС им. С.С. Атаева.

10. Тур, В.В. Проектирование сборных перекрытий их плит пустотного настила безопасного формования в свете зарубежных норм / В.В. Тур, Т.М. Пецольд, А.В. Щербач // Строительная наука и техника. – Минск, 2010. – №1-2. – С.15–24.

11. Белевич, В.Н. Прочность многопустотных плит «Weiler italia», заземленных в бетонной стене / В.Н. Белевич // Проблемы современного бетона и железобетона: сборник трудов: в 2 частях. Ч.1. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск: Минсктиппроект, 2009. – С. 97.

12. Лазовский, А.Д. Экспериментальное исследование платформенного стыка многопустотных плит безопасного формования / А.Д. Лазовский // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: Сборник научных статей XIX Международного научно-методического семинара: в 3 частях, Брест, 23–25 октября 2014 года. Часть I. – Брест: Брестский государственный технический университет, 2014. – С. 111–115.

13. Лазовский, А.Д. Соппротивление изгибу многопустотных плит перекрытий безопасного формования в составе платформенных стыков зданий: автореферат диссертации кандидата технических наук : 05.23.01 : защищена – 4.07.17 : утверждена 15.10.17 / Андрей Дмитриевич Лазовский. – Брест, 2017. – 27 с.

14. Лазовский, Д. Н. Влияние поперечного давления на сцепление предварительно напряженной проволочной арматуры с бетоном многопустотных плит / Д.Н. Лазовский, А.Д. Лазовский // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2024. №1(133). – С. 95–99.

## References

1. Kramar, V.G. Strength of joints between prestressed hollow-core floor panels and walls / V.G. Kramar, A.Ya. Epp, K.M. Arzumanyan, N.A. Pankov // The Ninth International Congress Of The FIP. – Moscow, 1982. – 19 p.

2. Klyueva, N.V. Residential and public buildings made of reinforced concrete panel-frame elements of industrial production / N.V. Klyueva, V.I. Kolchunov, D.A. Rypakov, A.S. Bukhtiyarova // Housing Construction. – 2015. – No. 5. – P.69–75.

3. Savin, S.Yu. Analysis of the survivability of prefabricated monolithic frames of multi-storey buildings made of reinforced concrete panel-frame elements under emergency impacts

caused by loss of stability of one of the columns / S.Yu. Savin, N.V. Fedorova, S.G. Emelyanov // Housing Construction. – 2018. – No. 12. – P. 3–7.

4. Kolchunov, V.I. Strength and deformability of prefabricated monolithic platform joints of panel buildings / V.I. Kolchunov, D.V. Martynenko. – DOI 10.33979/2073-7416-2019-82-2-26-34 // Construction and reconstruction. – 2019. – No. 2(82). – P. 26–34.

5. Kolchunov, V.I. Deformation and cracking of the platform joint structure in a prefabricated monolithic building frame / V.I. Kolchunov, D.V. Martynenko. – DOI 10.33979/2073-7416-2020-90-4-38-47 // Construction and reconstruction. – 2020. – No. 4(90). – P. 38–47.

6. Patent BY 10938 MPK E04B1/61 Platform prefabricated monolithic joint / Tur V.V., Lazovsky A.D. (BY); Polotsk State univ. – Application number u20150295; I will declare on 08/21/2015; Publ. 21.0.2015.

7. Patent 2589779 Russian Federation, IPC E04B 1/38. Platform prefabricated-monolithic joint / Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Filatova S.A., Martynenko D.V., applicant and patent holder of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Southwestern State University». – No. 2015113471/03 application. 04/13/2015; publ. 07/10/2016, Bulletin. No. 19. – 7 p.

8. Amgalan, E. Strength of support zones of hollow-core floor slabs made using cutting technology in platform joints of large-panel buildings / E. Amgalan // Student Science Days: Collection of reports of a scientific and technical conference on the results of research work of students of the Institute of Construction and Architecture National Research University MGSU (Moscow, March 02–05, 2020). – Moscow: Publishing house MISS – MGSU, 2020. – P. 332-334.

9. Multi-hollow reinforced concrete slabs prestressed without formwork molding using Vibropress equipment (Russia) for floors and coverings of residential, public and industrial buildings: Series B1.041.1-5.10 / Institute NIPTIS im. S. S. Ataeva.

10. Tur, V.V. Design of prefabricated floors and slabs of hollow-core flooring without formwork in the light of foreign standards / V.V. Tur, T.M. Pezold, A.V. Shcherbach // Construction science and technology. – Minsk, 2010. – No. 1–2. – P.15–24.

11. Belevich, V.N. Strength of hollow-core slabs “Weiler italia” clamped in a concrete wall / V.N. Belevich // Problems of modern concrete and reinforced concrete: collection. tr. At 2 p.m. Part 1. Concrete and reinforced concrete structures. – Minsk: Minsktiproekt, 2009. – P. 97.

12. Lazovsky, A.D. Experimental study of the platform joint of multi-hollow slabs without formwork molding / A.D. Lazovsky // Prospective directions of innovative development of construction and training of engineering personnel: Collection of scientific articles of the XIX International Scientific and Methodological Seminar: in 3 parts, Brest, October 23–25, 2014. Part I. – Brest: Brest State Technical University, 2014. – P. 111–115.

13. Lazovsky, A.D. Bending resistance of hollow-core floor slabs of formless molding as part of platform joints of buildings: abstract. dis. ...cand. tech. Sciences: 05.23.01: protected – 4.07.17: approved. 10.15.17 / Andrey Dmitrievich Lazovsky. – Brest, 2017. – 27 p.

14. Lazovsky, D.N. Influence of transverse pressure on the adhesion of prestressed wire reinforcement to concrete of hollow-core slabs / D.N. Lazovsky, A.D. Lazovsky // Bulletin of Brest State Technical University. – 2024. – No. 1(133). – P. 95–99.

УДК 624.072.2/.4

DOI 10.54734/20722958\_2025\_1\_117

Казанский филиал НОА Ассоциация  
«Ростехэкспертиза»

Россия, г.Казань, ул. Лейтенанта Шмидта,  
34/18

**Дымолазов Михаил Анатольевич,**  
ведущий инженер  
E-mail: maikl-d@mail.ru

Национальный исследовательский  
Московский государственный  
строительный университет

Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, 26

**Сабитов Линар Салихзанович,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Технология и организация  
строительного производства», советник  
РААСН, лауреат премии Правительства РФ  
в области науки и техники  
E-mail: l.sabitov@bk.ru

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Гарькина Ирина Александровна,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Математика  
и математическое моделирование»  
E-mail: fmatem@pguas.ru

Kazan branch of the NOA Association  
«Rostecexpertiza»

Russia, Kazan, 34/18, Lieutenant Schmidt St.

**Dymolazov Mikhail Anatolyevich,**  
Lead engineer  
E-mail: maikl-d@mail.ru

National Research Moscow State University  
of Civil Engineering

Russia, Moscow, 26, Yaroslavskoe shosse

**Sabitov Linar Salikhzanovich,**  
Doctor of Sciences, Professor of the  
Department «Technology and Organization of  
Construction Production», advisor to RAASN,  
laureate of the Russian Government Prize in  
the field of science and technology  
E-mail: l.sabitov@bk.ru

Penza State University of Architecture  
and Construction

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Garkina Irina Aleksandrovna,**  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the Department «Mathematics and  
Mathematical Modeling»  
E-mail: fmatem@pguas.ru

## ВЫЯВЛЕНИЕ РЕЗЕРВОВ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТРУКТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

М.А. Дымолазов, Л.С. Сабитов, И.А. Гарькина

Рассматриваются типовые структурные конструкции типа «Кисловодск», модифицированные структурные конструкции и структурные конструкции с разными типами опирания. Предлагается методика анализа эффективности использования материала в структурных покрытиях с использованием коэффициента полноты использования несущей способности конструкции. Дается анализ резервов несущей способности структурных конструкций с использованием нескольких показателей эффективности (теоретический вес, «силовой вес», «коэффициент полноты использования несущей способности конструкции»).

*Ключевые слова: структурные покрытия, шарнирно-стержневые конструкции, типы опирания, несущая способность, резерв несущей способности, рациональное размещение материала, оценка эффективности, показатель*

## STUDY OF RESERVES OF LOAD-BEARING CAPACITY OF STRUCTURAL DESIGNS

M.A. Dymolazov, L.S. Sabitov, I.A. Garkina

The article considers typical structural designs of Kislovodsk type, modified structural designs and structural designs with different types of support. It proposes a method for analyzing the efficiency of using materials in structural coatings using the coefficient of completeness of use of the designs bearing capacity. It provides an analysis of the reserves of the designs bearing capacity using

several efficiency indicators (theoretical weight, «force weight», «coefficient of completeness of use of the designs bearing capacity»).

*Keywords: structural coatings, hinged-rod structures, types of support, bearing capacity, reserve of bearing capacity, rational placement of material, performance evaluation, indicator*

Показатель оценки эффективности использования материала отражает долю использованной несущей способности каждого элемента и должен быть относительным (в показатель должна входить использованная доля несущей способности отдельных стержней, отнесенная к объему или массе всей конструкции) [1, 2]. Этому требованию будут отвечать следующие варианты коэффициентов:

$K_1 = \sum (|N_i| \cdot A_i \cdot l_i) / \sum (N_i^* \cdot A_i \cdot l_i)$  – отношение объема действующих усилий к объему несущей способности;

$K_2 = \sum (\sigma_i \cdot l_i) / \sum (R_y \cdot l_i)$  – отношение суммы эпюр напряжений к сумме эпюр несущей способности;

$K_3 = \sum \left( \frac{|N_i|}{N_i^*} \cdot A_i \cdot l_i \right) / \sum (A_i \cdot l_i)$  – относительный объем используемой несущей способности.

Для оценки эффективности использования металла в шарнирно-стержневых конструкциях предлагается использовать относительный объем используемой несущей способности [3, 4]. Показатель  $K_{\text{пнн}}$  – коэффициент полноты использования несущей способности конструкции (или коэффициент использования несущей способности) – определяется следующим образом:

$$K_{\text{пнн}} = \sum \left( \frac{|N_i|}{N_i^*} \cdot A_i \cdot l_i \right) / \sum (A_i \cdot l_i), \quad (1)$$

где  $|N_i|$  – абсолютное значение действующего усилия в  $i$ -м элементе;  $l_i$  – длина  $i$ -го элемента;  $A_i$  – площадь  $i$ -го элемента;  $N_i^*$  – несущая способность  $i$ -го элемента, равная:  $N_i^* = A_i \cdot R_y \cdot \gamma_c$  – для растянутого и  $N_i^* = A_i \cdot \varphi \cdot R_y \cdot \gamma_c$  – для сжатого элемента.

Резерв несущей способности для шарнирно-закрепленного стержня – разность между его несущей способностью и напряжением в нем:

$$R_y \gamma_c - |\sigma|;$$

в относительных величинах:

$$(R_y \gamma_c - |\sigma|) / (R_y \gamma_c)$$

или

$$1 - (|\sigma|) / (R_y \gamma_c),$$

$(|\sigma|) / (R_y \gamma_c)$  – доля использованной несущей способности стержня.

Эффективность работы материала в шарнирно-стержневых конструкциях можно численно оценить коэффициентом полноты использования несущей способности конструкции  $K_{\text{пнн}}$  (аналог доли неиспользованной несущей способности отдельного стержня) [5, 6]. Следовательно, резервом несущей способности шарнирно-стержневой конструкции можно назвать разницу  $P_{\text{нс}} = 1 - K_{\text{пнн}}$ .

Само понятие «резерв несущей способности» может иметь двоякое использование: во-первых, большой резерв несущей способности конструкции характеризует последнюю как нерациональную с точки зрения использования материала; во-вторых, большой резерв несущей способности конструкции позволяет использовать этот резерв при усилении последней. Кроме этого, коэффициент полноты использования несущей способности конструкции  $K_{\text{пнн}}$  можно использовать в качестве основного параметра при оптимизации размещения материала в шарнирно-стержневой конструкции.

Учет дискретности геометрических характеристик сечений стержней вносимой сортаментом, приводит к увеличению массы конструкции. Возникает необходимость исследовать эффективность работы материала в структурных конструкциях с учетом дискретности сортамента [7, 8].

Оценим эффективность использования материала в структурных конструкциях с различными вариантами опирания при использовании в них одного типа стержней.

Исследуется регулярная структурная конструкция. Нагрузка приложена в узлы верхнего пояса. Работа материала предполагается в упругой стадии. Учитывается устойчивость стержней. Стержни структуры выполнены из круглых труб. При определении геометрических характеристик сечения стержней учитывается дискретность сортамента. Рассмотрим шесть вариантов опирания покрытия:

- шарнирное по контуру;
- по четырем углам;
- без капителей с консольной частью;
- с капителями с консольной частью;
- опирание по контуру по нижнему поясу;
- опирание по контуру по верхнему поясу.

При назначении жесткостей стержней используется один тип сечения. Назначается он по результатам предварительного статического расчета и определяется по максимальному усилию в каком-либо стержне конструкции.

Конструктивно структурный блок выполнен аналогично структурной плите типа «Кисловодск» с размерами в плане 30×30 м при расчетной нагрузке 260 кг/м<sup>2</sup>. Размер поясной сетки – 3 м. Высота структуры – 2,12 м. В набор рассматриваемых типов стержней включены 8 типов сечений стержней (8 типов жесткостей). Из них 5 типов соответствуют стержням структуры типа «Кисловодск» серии 1.466-2 (обозначения С1, С2, С3, С4, С5), а 3 типа дополнительные. Параметры сечений используемых труб приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Характеристики типов сечений

№ п/п	Обозначение	Диаметр, мм	Толщина, мм	Площадь сечения, см <sup>2</sup>	Несущая способность	
					на растяжение	на сжатие
1	С4	60	3	5.3	11.3	-3
2	С3	76	3	6.88	14.4	-5.6
3	С2	102	4	12.315	25.4	-14.6
4	С1	114	6	20.36	42.6	-26.4
5	С5	127	7	26.39	55	-38
6		219	6	40.2	84.42	-75.47
7		219	9	59.4	124.74	-111.518
8		325	9	89.3	187.53	-177.78

Ограничения по несущей способности болта в узловом соединении на растяжение не учитываются. Предполагается, что его несущая способность превышает несущую способность на растяжение любого из рассматриваемых стержней. При определении несущей способности типов стержней принимается расчетное сопротивление  $R_y=2100$  кг/см<sup>2</sup> (см. проект серии 1.466-2). Для вновь вводимых типов используется то же расчетное сопротивление.

При исследовании рассматриваются типы опирания структур, представленные на рис. 1.



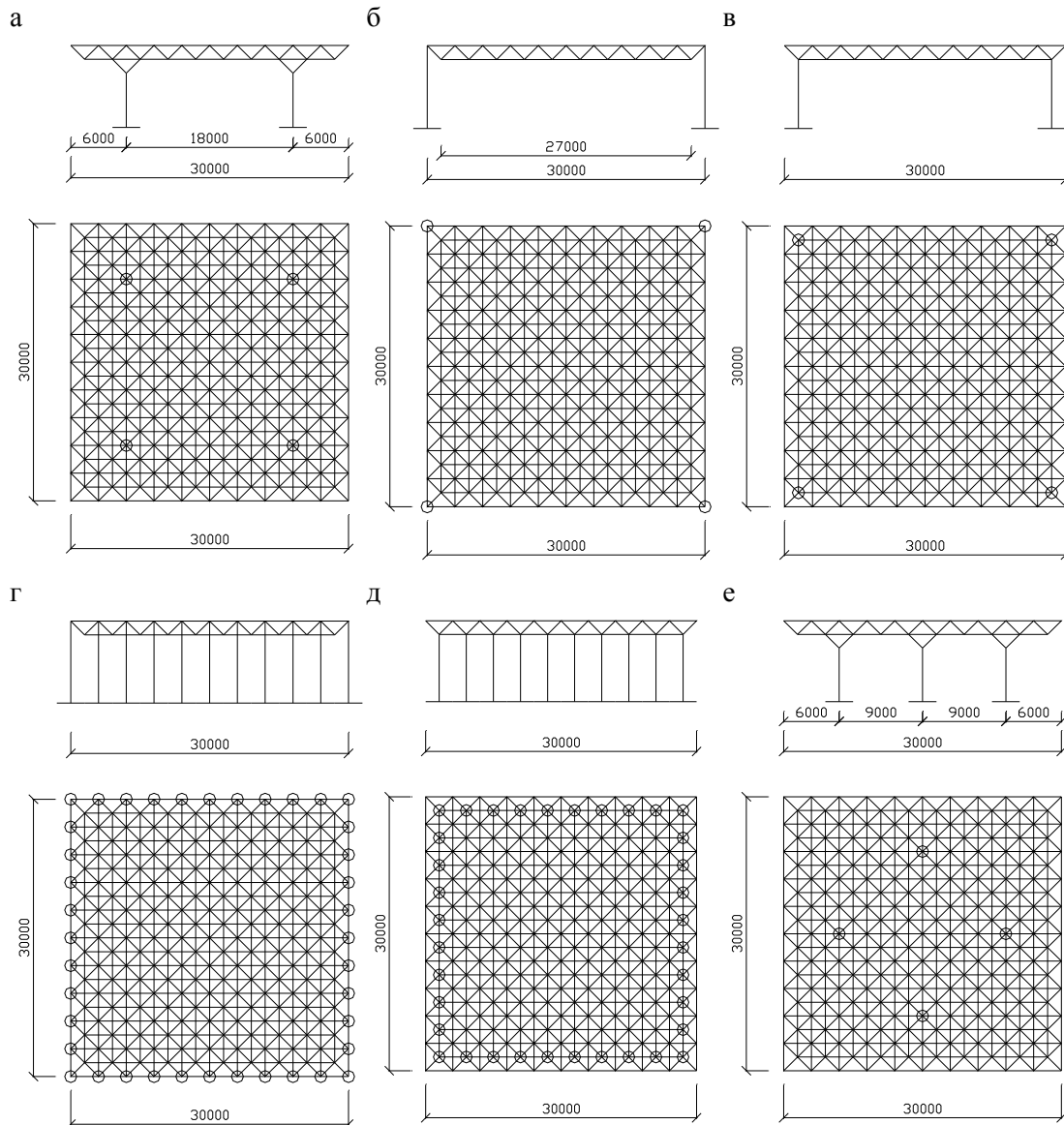


Рис. 1. Схемы опирания структурных конструкций:

а – типовое опирание через капитальные опорные раскосы по 4 внутренним точкам с консольными свесами (“kt”); б – опирание по 4 углам верхнего пояса (“ku”); в – опирание по 4 углам нижнего пояса (“kl”); г – опирание по периметру верхнего пояса (“kr”); д – опирание по периметру нижнего пояса (“kd”); е – опирание по 4 точкам через капитальные опорные раскосы в середине сторон квадрата (“ks”)

Статический расчет исследуемых покрытий проводился с использованием расчетного комплекса «ЛИРА-САПР». Результаты статического расчета используются при определении нескольких показателей эффективности: теоретический вес (вес всех стержней без учета узловых элементов); «силовой вес»; коэффициент полноты использования несущей способности  $K_{\text{пнн}}$ , определенный для всей конструкции и отдельно по основным группам стержней [9]. Для облегчения обработки такого большого объема данных (количество стержней порядка 880 в конструкции) используется специально разработанная программа.

Результаты расчетов эффективности использования материала в конструкции приведены в табл. 2.

## Показатели эффективности использования материала в структурах с одним типом стержней при разных типах опирания

Наименование характеристики эффективности	Условные обозначения типов опирания					
	kt	ku	kn	kp	kd	ks
$K_{\text{пир}}$	0,108084	0,15176	0,160461	0,212948	0,143456	0,119247
$K_{\text{пир}}$ (для стержней верхнего пояса)	0,108526	0,243689	0,241999	0,3664	0,224235	0,132629
$K_{\text{пир}}$ (для стержней нижнего пояса)	0,0902	0,256898	0,269667	0,273337	0,168246	0,164308
$K_{\text{пир}}$ (для раскосов)	0,0857	0,0539	0,0665	0,101374	0,0879	0,0724
$K_{\text{пир}}$ (для опорных раскосов)	0,862053	-	-	-	-	0,5989
Силовой вес, т·м	8368,746	42890,64	30660,26	16660,16	11095,22	12989,71
Теоретический вес, т	39,1254	111,9096	75,7368	38,35824	38,35824	50,71313
Сечение стержня $d \times t$ , мм	114x6	219x9	219x6	114x6	114x6	127x7
Максимальное растягивающее усилие, т	8,857	97,2248	69,716	24,558	16,582	22,182
Максимальное сжимающее усилие, т	- 23,158	- 91,579	- 60,608	- 22,182	- 18,426	- 31,629

По этим данным были построены гистограммы, представленные на рис. 2–5.

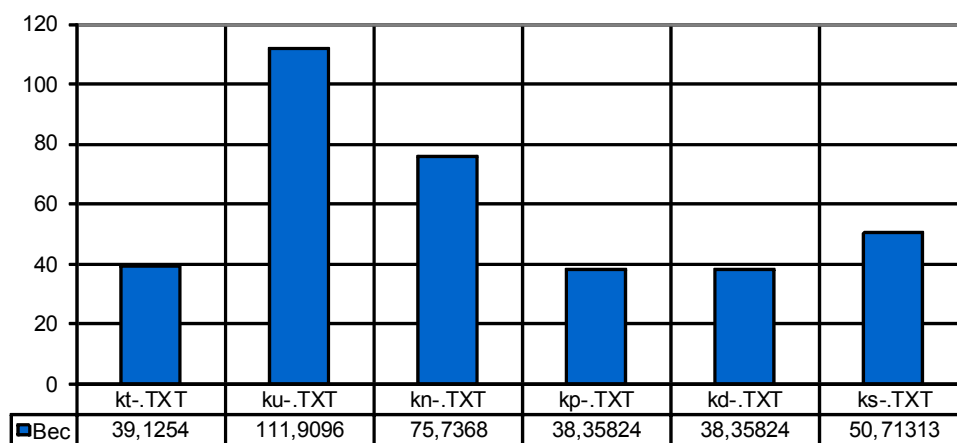


Рис. 2. Гистограмма теоретического веса для различных опираний структур с одним типом стержней

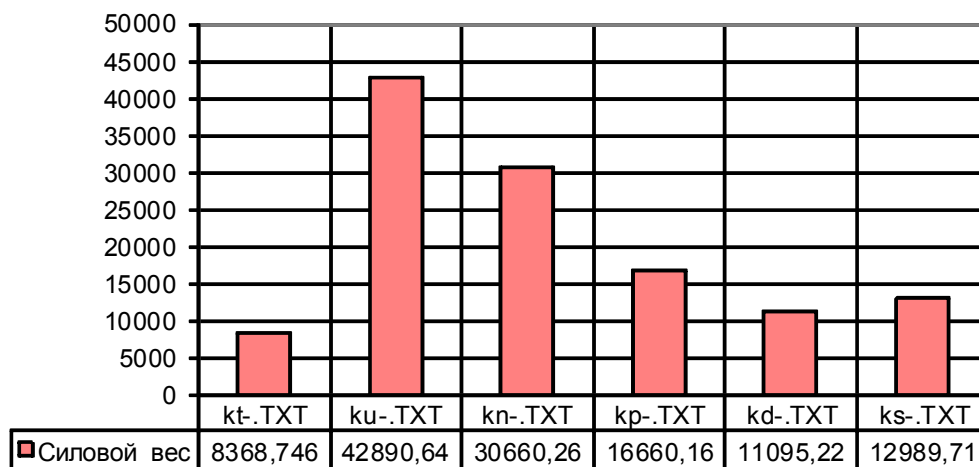


Рис. 3. Гистограмма «силового веса» для различных опираний структур с одним типом стержней

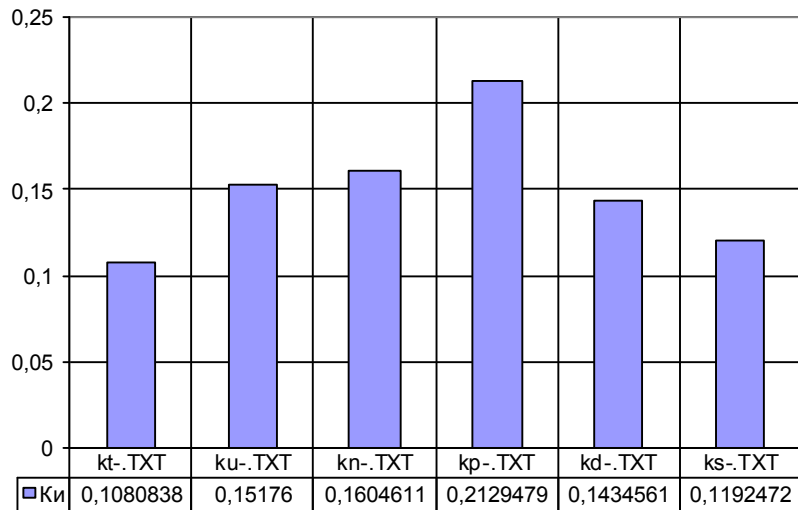


Рис. 4. Гистограмма  $K_{\text{пinn}}$  для различных опираний структур с одним типом стержней

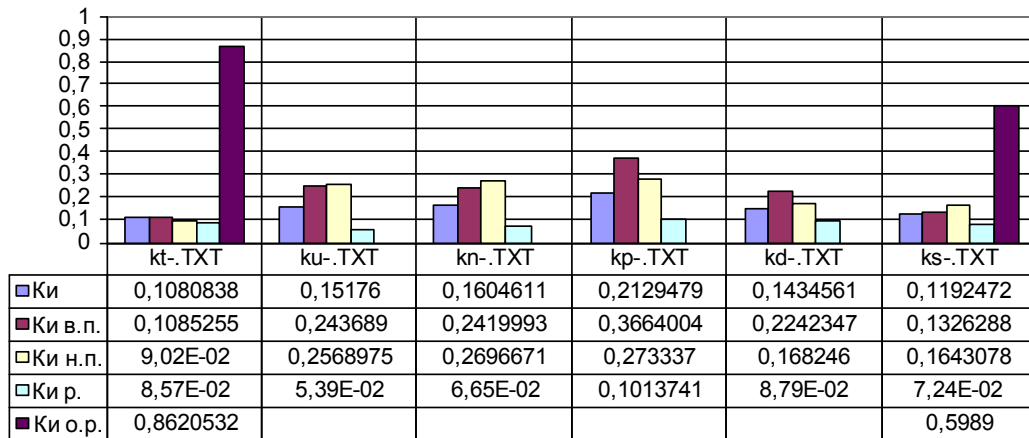


Рис. 5. Гистограмма  $K_n$  основных групп стержней для различных опираний структур с одним типом стержней

Сравнив теоретический вес структур с разными типами опирания, отметим, что наименее рациональным с точки зрения веса конструкции является опирание по 4 угловым точкам, особенно по верхним поясам (теоретический вес конструкции – максимальный из рассмотренных вариантов). Наиболее рациональными типами опирания являются типовое и опирание по контуру (по верхним и по нижним поясам). Теоретический вес этих типов примерно одинаков. По эффективности использования несущей способности предпочтительнее тип опирания по контуру по верхним поясам ( $K_{\text{пinn}} = 0,213$  по сравнению с  $K_{\text{пinn}} = 0,14$  для опирания по периметру по нижним поясам и  $K_{\text{пinn}} = 0,108$  для типового опирания.).

Анализируя эффективность использования несущей способности по основным группам стержней, можно отметить, что решетка (раскосы) работает наименее эффективно (по сравнению с поясами). Наибольшая эффективность работы наблюдается у самых нагруженных капитальных опорных раскосов (работают в 5–8 раз эффективнее, чем вся конструкция в целом). Оценивая типы опирания структур с помощью характеристики «силовой вес», предпочтение следует отдать типовому опиранию (у него наименьший показатель «силового веса»), хотя по теоретическому весу этот тип опирания близок к опиранию по контуру.

Оценим эффективность использования материала в структурных конструкциях с различными вариантами опирания при рациональном распределении жесткостей по стержням.

Рассматриваются те же регулярные структурные конструкции (см. рис. 1).

При назначении жесткостей в структурных конструкциях реализован алгоритм последовательного многократного прочностного перерасчета:

- для всех используемых типов стержней определяются геометрические характеристики и несущая способность на сжатие и на растяжение;
- всем стержням назначается одинаковая жесткость (например, минимальная из используемых);
- проводится статический расчет структурной плиты с помощью известных пакетов и комплексов (например, расчетными комплексами “ЛИРА” или “Скад”) на действие расчетной нагрузки с определением напряженно-деформированного состояния структуры;
- по результатам статического расчета для всех стержней выбираются типы сечений с достаточной несущей способностью;
- проводится повторный статический расчет структурной плиты с помощью тех же известных пакетов и комплексов с новым распределением жесткостей по стержням;
- по результатам повторного статического расчета вновь назначаются типы сечений, т.е. задается новое распределение жесткостей в структурной конструкции;
- расчеты повторяются до тех пор, пока распределение жесткостей не будет изменяться.

Расчеты показывают, что процесс перераспределения жесткостей достаточно быстро сходится, и через 3-4 шага из-за дискретности сортамента распределение жесткостей уже не меняется.

Описанный алгоритм реализован с использованием вычислительного комплекса «ЛИРА-САПР»; обработка результатов статического расчета и подготовка новых исходных данных для статического расчета проводилась в специально разработанной программе на языке Basic; для визуализации результатов расчетов формировался файл на языке Autolisp, с помощью которого в графическом редакторе AutoCad выводится расчетная схема конструкции с условными обозначениями жесткостей стержней.

Исследование проводилось на структурном блоке, аналогичном структурной плите типа «Кисловодск» с размерами в плане 30×30 м под нагрузку 260 кг/м<sup>2</sup>, с таким же набором используемых типов стержней (8 типов жесткостей). Размер поясной сетки – 3 м. Высота структуры – 2,12 м. Параметры сечений используемых труб приведены в табл. 1.

При исследовании рассматривались те же 6 типов опирания структур (см. рис. 1). Для перечисленных 6 типов опирания было определено рациональное размещение жесткостей стержней по покрытию. Для каждого варианта опирания определено рациональное количество типов сечений стержней (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Показатели эффективности использования материала в структурах с рациональным размещением жесткостей при разных типах опирания

Наименование характеристики эффективности	Условные обозначения типов опирания					
	kt	ku	kn	kp	kd	ks
$K_{\text{пни}}$	0,454311	0,662452	0,641477	0,577256	0,496975	0,518801
$K_{\text{пни}}$ стержней верхнего пояса	0,431184	0,688724	0,663565	0,681098	0,547613	0,518085
$K_{\text{пни}}$ стержней нижнего пояса	0,424333	0,770435	0,77912	0,652909	0,53059	0,575066
$K_{\text{пни}}$ раскосов	0,424938	0,508826	0,502727	0,421364	0,440203	0,435339
$K_{\text{пни}}$ опорных раскосов	0,862053					0,93611
Силовой вес, т·м	8292,405	41989,2	30718,69	15918,38	10647,99	12517,36
Теоретический вес, т	12,06759	28,14559	22,66113	15,39447	12,99468	14,02264
Количество типов стержней	4	7	6	4	4	5

По этим данным построены гистограммы (рис. 6–10).

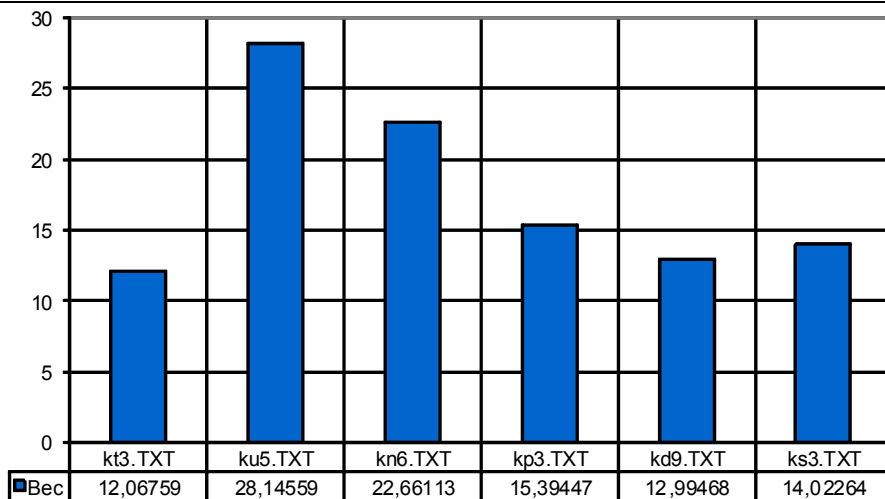


Рис. 6. Гистограмма теоретического веса для различных опорных структур с рациональным размещением жесткостей

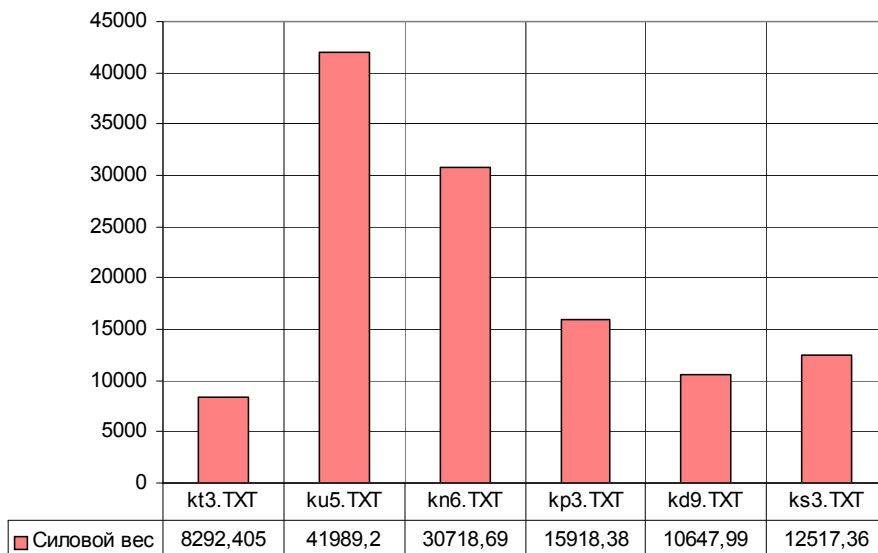


Рис. 7. Гистограмма «силового веса» для различных опорных структур с рациональным размещением жесткостей

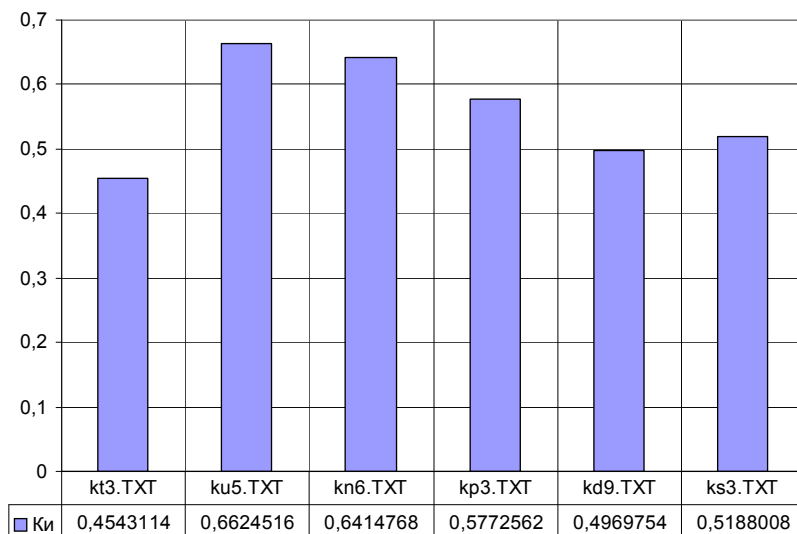


Рис. 8. Гистограмма  $K_n$  для различных опорных структур с рациональным размещением жесткостей

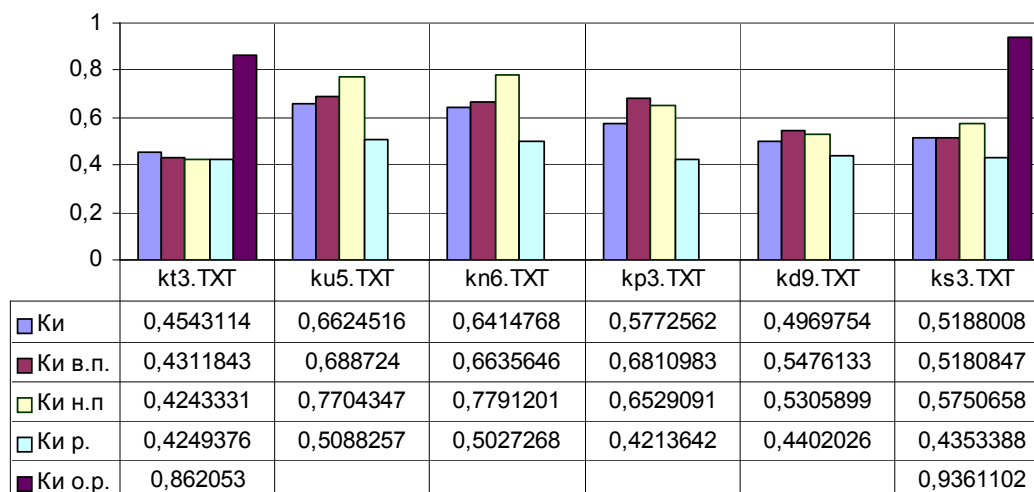


Рис. 9. Гистограмма  $K_{\text{пinn}}$  основных групп стержней для различных опораний структур с рациональным размещением жесткостей

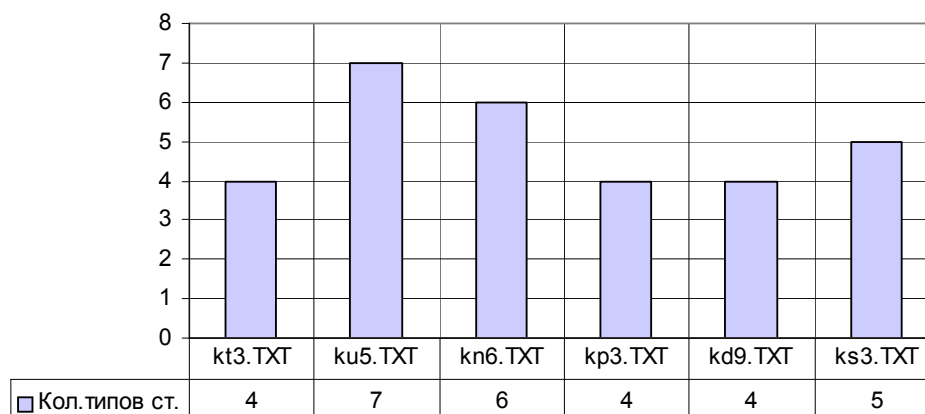


Рис. 10. Гистограмма количества типов стержней для различных опораний структур с рациональным размещением жесткостей

Анализируя показатель теоретического веса конструкций, можно отметить, что наименее предпочтительным является тип опорания по 4 углам (особенно с опоранием по верхнему поясу); теоретический вес почти в 2 раза больше, чем у остальных типов. Наиболее рациональным является типовое опорание и опорание по периметру по нижнему поясу. По эффективности использования несущей способности наиболее эффективно работают стержни при опорании по 4 угловым точкам по верхнему и по нижнему поясу. Эффективность использования несущей способности возросла по сравнению с аналогичным опоранием структуры с одним типом стержней в 2–4 раза. Для типового опорания эффективность возросла с  $K_{\text{пinn}} = 0,108$  до  $K_{\text{пinn}} = 0,454$  (в 4,2 раза), а для опорания по 4 угловым точкам по верхнему поясу с  $K_{\text{пinn}} = 0,152$  до  $K_{\text{пinn}} = 0,662$  (в 4,36 раза). Меньше всего повысилась эффективность использования несущей способности стержней при типе опорания по контуру по верхнему поясу (всего в 2,7 раза). Соответственно, снижается резерв по несущей способности конструкции в целом. По критерию «силовой вес» предпочтительнее типовое опорание, опорание по периметру по нижнему поясу и опорание по 4 точкам с использованием капитальных опорных раскосов в середине квадрата (рис. 1,е). Рассматривая эффективность использования несущей способности по основным группам стержней, можно отметить, что стержни решетки (раскосы) работают наименее эффективно по сравнению с поясами (исключение составляет типовое опорание). При таком типе опорания эффективность работы поясов и решетки практически одинакова. Как и в случае с одним типом стержней, в структурной конструкции наиболее эффективно работают

капитальные опорные раскосы. Эффективность их работы почти в 2 раза выше, чем поясов. По количеству используемых типов стержней (рис. 8) следует выделить типовое опирание, опирание по контуру (по нижнему и верхнему поясу) и опирание по 4 точкам с использованием капитальных опорных раскосов по серединам сторон квадрата (рис. 1,е). При таких опираниях используются наименьшее количество типов стержней. Как уже отмечалось, наиболее рациональное число типов сечений стержней в структурных конструкциях – 4–5.

Анализируя работу стержней, следует отметить, что при типовом опирании структуры (рис. 1,а) все стержни типов 1, 2 и 3 работают только на сжатие и только стержни 4-го типа сечения работают и на сжатие, и на растяжение. При других типах опирания стержни в основном работают и на растяжение, и на сжатие. Имеются только отдельные типы (по одному из 4–7 типов стержней), которые работают только на сжатие.

### Выводы

Дан анализ резервов несущей способности с использованием нескольких показателей эффективности (теоретический вес, силовой вес, коэффициент полноты использования несущей способности конструкции).

Эффективность использования несущей способности в шарнирно-стержневых системах покрытия целесообразно оценивать коэффициентом полноты использования несущей способности (когда вес конструкции, силовой вес конструкции и некоторые другие частные характеристики не позволяют сравнивать и оценивать эффективность работы материала).

При увеличении конструктивных ограничений на минимальную площадь эффективность работы элементов падает и увеличивается резерв по несущей способности системы в целом.

Показано, что наименее эффективно используется площадь раскосов (для них  $K_{\text{мин}}$  наиболее низкий по сравнению с другими группами элементов; в них заключается основной резерв по несущей способности).

### Список литературы

1. Лампси, Б.Б. Жесткость узлов подкраново-подстропильной фермы в её плоскости / Б.Б. Лампси, Ю.Д. Маркина // Строительная механика и конструкции. – 2023. – № 4 (39). – С. 51–63.
2. Агафонкин, В.С. Анализ конструктивного решения стального каркаса здания терминала 1а международного аэропорта Казань / В.С. Агафонкин, М.А. Дымолазов, Л.А. Исаева // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 4 (30). – С. 128–133.
3. Евсеев, А.Е. Способ получения матрицы жёсткости стержневого конечного элемента для деформационного расчета по дифференциальному уравнению / А.Е. Евсеев, И.Н. Гарькин, Ф.М. Ахметов // Системные технологии. – 2024. – № 2 (51). – С. 5–13.
4. Айзатуллин, М.М. Цифровое моделирование и САПР в определении напряженно-деформированного состояния сооружений / М.М. Айзатуллин, Л.С. Сабитов, И.А. Гарькина, И.К. Киямов, М.К. Сайфетдинова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2024. – №9. – С.7–11.
5. Мирхасанов, Р.Ф. Использование металлического каркаса как преобладание формы над содержанием в объемно-пространственной композиции / Р.Ф. Мирхасанов, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2023. – № 1 (43). – С. 61–65.
6. Лампси, Б.Б. Исследование напряженно-деформированного состояния фланцевых соединений стальных башенных сооружений / Б.Б. Лампси, Ю.Д. Маркина // Приволжский научный журнал. – 2020. – № 1 (53). – С. 11–15.
7. Рыбаков, В.А. Совместная работа стальных тонкостенных профилей и легкого бетона в конструкции перекрытия / В.А. Рыбаков, С.Н. Дружинина // Инженерные исследования. – 2024. – № 2 (17). – С. 22–27.

8. Нежданов, К.К. Конструкция спирального виадука / К.К. Нежданов, С.А. Антонов // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 3. – С. 86–90.
9. Туманов, В.А. Повышение выносности стальных подкрановых балок / В.А. Туманов // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 1. – С. 75–82.

#### References

1. Lampsı, B.B. Rigidity of the nodes of the undercrane-subrafter truss in its plane / B.B. Lampsı, Yu.D. Markina // Structural mechanics and structures. – 2023. – № 4 (39). – P. 51–63.
2. Agafonkin, V.S. Analysis of the structural solution of the steel frame of the building of terminal 1a of Kazan international airport / V.S. Agafonkin, M.A. Dymolazov, L.A. Isaeva // Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2014. – №4 (30). – P. 128–133.
3. Evseev, A.E. Method for obtaining the stiffness matrix of a rod finite element for deformation calculation using a differential equation / A.E. Evseev, I.N. Garkin, F.M. Akhmetov // System technologies. – 2024. – № 2 (51). – P. 5–13.
4. Aizatullin, M.M. Digital modeling and CAD in determining the stress-strain state of structures / M.M. Aizatullin, L.S. Sabitov, I.A. Garkina, I.K. Kiyamov, M.K. Saifetdinova // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. – 2024. – № 9. – P. 7–11
5. Mirkhasanov, R.F. Using a metal frame as a predominance of form over content in a volumetric-spatial composition / R.F. Mirkhasanov, L.S. Sabitov, I.N. Garkin // Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region. – 2023. – № 1 (43). – P. 61–65.
6. Lampsı, B.B. Study of the stress-strain state of flange joints of steel tower structures / B.B. Lampsı, Yu.D. Markina // Volga Region Scientific Journal. – 2020. – № 1 (53). – P. 11–15
7. Rybakov, V.A. Joint work of thin-walled steel sections and lightweight concrete in the floor structure / V.A. Rybakov, S.N. Druzhinina // Engineering research. – 2024. – № 2 (17). – P. 22–27.
8. Nezhdanov, K.K. Spiral viaduct design / K.K. Nezhdanov, S.A. Antonov // Regional architecture and engineering. – 2013. – №3. – P. 86–90.
9. Tumanov, V.A. Increasing the endurance of steel crane beams / V.A. Tumanov // Regional architecture and engineering. – 2012. – № 1. – P. 75–82.



УДК 691.328.1

DOI 10.54734/20722958\_2025\_1\_128

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Комаров Виктор Александрович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
профессор кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: komarov58reg@yandex.ru

**Ласьков Сергей Николаевич**,  
ассистент кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: laskovsn@yandex.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Komarov Victor Alexandrovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor,  
Professor of the Department «Building  
Structures»  
E-mail: komarov58reg@yandex.ru

**Laskov Sergey Nikolaevich**,  
Assistant of the Department «Building  
Structures»  
E-mail: laskovsn@yandex.ru

## ПРОЧНОСТЬ ПОЛОС БЕТОНА МЕЖДУ НЕПЕРЕСЕКАЮЩИМИСЯ ТРЕЩИНАМИ В СЖАТО-РАСТЯНУТЫХ ОПОРНЫХ ЗОНАХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.А. Комаров, С.Н. Ласьков

Описываются механизмы двух экспериментально полученных схем разрушения опорных зон железобетонных балок между наклонными трещинами в результате раздробления бетона от сжатия и в результате среза сжатой полосы. Приводятся результаты анализа изменения прочности бетона в плосконапряженных сжато-растянутых полосах между непересекающимися трещинами. Предельное состояние бетона оценивается критериями прочности в зависимости от соотношения совместного действия главных сжимающих и растягивающих напряжений. Соотношение между напряжениями определяется методом компьютерного моделирования.

*Ключевые слова: изгибаемые элементы, прочность бетона, сжато-растянутые опорные зоны, сжатые полосы, непересекающиеся трещины*

## THE STRENGTH OF CONCRETE STRIPS BETWEEN NON-INTERSECTING CRACKS IN THE COMPRESSED- STRETCHED SUPPORT ZONES OF THE BENDABLE ELEMENTS

V.A. Komarov, S.N. Laskov

The mechanisms of two experimentally obtained schemes of destruction of the support zones of reinforced concrete beams between inclined cracks as a result of concrete fragmentation from compression and as a result of a compressed strip shear are described. The analysis of the change in the strength of concrete in flat-stressed compressed-stretched strips between non-intersecting cracks is given. An ultimate concrete condition is assessed by strength criteria depending on the ratio of the combined action of the main compressive and tensile stresses. The ratio between the stresses is determined by computer simulation.

*Keywords: bendable elements, concrete strength, compressed-stretched support zones, compressed strips, non-intersecting cracks*

**Введение.** В плосконапряженных сжато-растянутых железобетонных элементах с непересекающимися трещинами можно выделить два типа разрушения: в результате раздробления бетона между трещинами и в результате разрыва поперечной арматуры с последующим срезом бетона внутри сжатой полосы. При оценке прочности бетона необходимо учитывать основные факторы, оказывающие влияние на напряженно-де-

формированное состояние конструкций. Одним из важных параметров, существенно влияющих на общий характер деформирования и разрушение железобетона, является прочность полос бетона между наклонными трещинами. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о значительном снижении прочности сжато-растянутых полос бетона при статическом нагружении в условиях плоского напряженного состояния [1].

**Результаты и методы.** Эффект разупрочнения бетона, проявляющийся в снижении прочности, связывают, как правило, с развивающимися в направлении, перпендикулярном к наклонной сжатой полосе, растягивающими деформациями.

После образования в железобетонном элементе наклонных трещин главные растягивающие деформации (действующие «поперек» трещин) способствуют снижению прочности при сжатии бетона, заключенного между трещинами в наклонной сжатой полосе, то есть происходит разупрочнение бетона в напряженно-деформированном состоянии «сжатие-растяжение».

Величина коэффициента разупрочнения бетона зависит от многих факторов, среди которых наиболее значимым считают величину главных растягивающих деформаций [3].

Базируясь на испытаниях панелей Vecchio, FJ. and Collins в условиях одноосного сжатия при одноосном растяжении, эффект снижения прочности сжатой полосы учитывают с помощью экспериментального коэффициента разупрочнения  $\beta$ , величину которого определяют в зависимости от отношения средних главных растягивающих и сжимающих деформаций  $\varepsilon_1 / \varepsilon_2$  по формуле

$$\beta = \frac{1}{0,85 - 0,27 \cdot \varepsilon_1 / \varepsilon_2}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_1$  – средние главные растягивающие деформации для элемента с диагональными трещинами (в направлении «поперек» трещины);  $\varepsilon_2$  – главные сжимающие деформации в полосе, заключенной между диагональными трещинами.

В последующем зависимость (1) упростили до вида:

$$\beta = \frac{1}{0,80 - 0,34 \cdot \varepsilon_1 / \varepsilon_0}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_0$  – относительная деформация, соответствующая пиковой точке диаграммы деформирования бетона в условиях осевого кратковременного сжатия и принятая  $\varepsilon_0 = 0.002$ .

Коэффициенты изменения деформаций  $\beta_\varepsilon$ , напряжений  $\beta_\sigma$  при пропорциональном нагружении для традиционных бетонов классов не более В40 имеют достаточно близкие значения; предложено определять значение базового коэффициента  $\beta = \beta_\varepsilon = \beta_\sigma$  по формуле

$$\beta = \frac{0,9}{\sqrt{1 + 400 \cdot \varepsilon_r}}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_r$  – главные растягивающие деформации, определяемые по графику (рис. 1).

Для описания диаграммы деформирования бетона при сжатии в условиях растяжения предложено аналитическое описание, имеющее в основе параболу «Hognestada»:

при  $\varepsilon_{d(2)} / \beta_{\varepsilon_0} \leq 1$  – восходящая ветвь диаграммы;

$$\sigma_{d(2)} = \beta \cdot f'_c \cdot \left[ 2 \cdot \left( \frac{\varepsilon_{d(2)}}{\beta_{\varepsilon_0}} \right) - \left( \frac{\varepsilon_{d(2)}}{\beta_{\varepsilon_0}} \right)^2 \right]; \quad (4)$$

при  $\varepsilon_{d(2)} / \beta_{\varepsilon_0} > 1$  – нисходящая ветвь диаграммы;

$$\sigma_{d(2)} = \beta \cdot f'_c \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\varepsilon_{d(2)} / \beta_{\varepsilon_0} - 1}{2 / \beta - 1} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

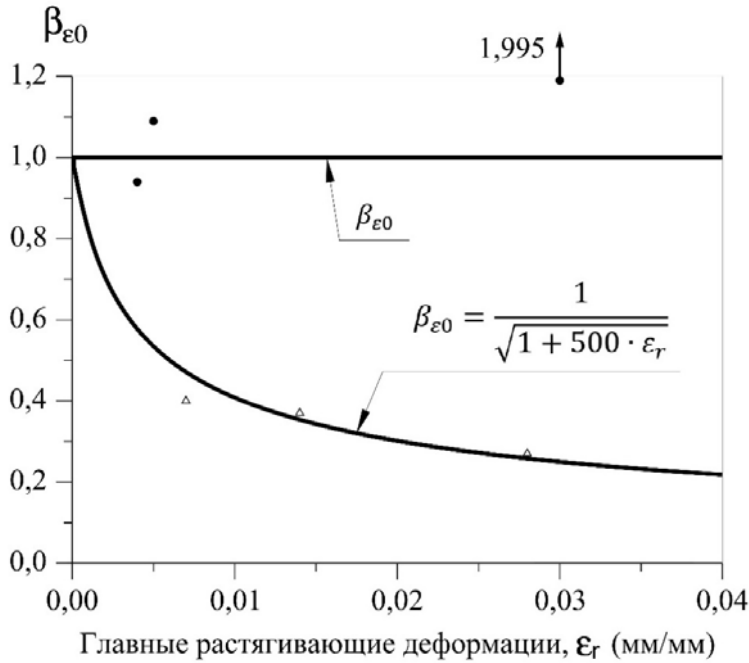


Рис. 1. Зависимость коэффициента  $\beta_{\varepsilon_0}$  от величины главных растягивающих деформаций  $\varepsilon_r$ .

Графическая интерпретация трансформированной диаграммы деформирования « $\sigma_{d(2)} - \varepsilon_{d(2)}$ » бетона при сжатии в условиях растяжения показана на рис. 2.

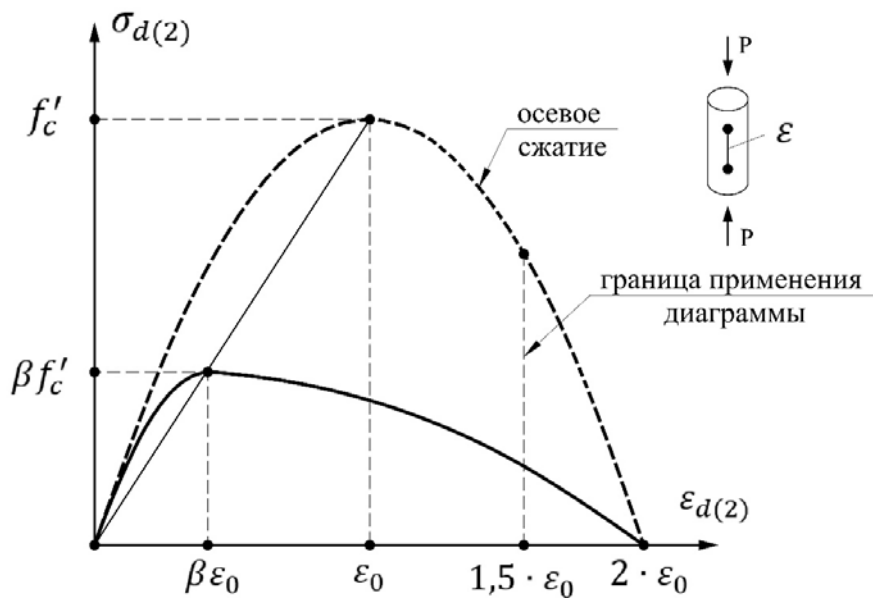


Рис. 2. Трансформированная диаграмма « $\sigma_{d(2)} - \varepsilon_{d(2)}$ » при сжатии бетона железобетонного элемента с трещинами

Испытания, выполненные на балочных образцах, не позволили получить надежные зависимости, связывающие главные сжимающие напряжения, действующие в наклонной сжатой полосе, как функцию от главных сжимающих и растягивающих деформаций и определить значения коэффициентов разупрочнения, используемых при трансформации базовых диаграмм деформирования бетона при осевом кратковременном сжатии в условиях растяжения.

Это в первую очередь связано с тем, что стенка балки под действием изгибающих моментов продольных и поперечных сил находится в условиях сложного напряженно-деформированного состояния как по высоте сечения, так и по длине элемента.

Обобщенные характеристики прочности материалов принято представлять в виде предельных поверхностей разрушения, для построения которых требуется проведение большого количества сложных экспериментов.

Из-за разнообразия видов бетона и неоднородности этого материала в практических расчетах используют критерии прочности – упрощенные гипотезы разрушения при сложном напряженном состоянии. Согласно критериям прочности, любое сложное напряженное состояние сводится к эквивалентному одноосному состоянию.

Критерий прочности бетона представляет собой аналитическую функциональную зависимость между предельными значениями главных напряжений либо нормальных и касательных напряжений.

Для определения предельных напряжений принят критерий, разработанный профессором А.А. Гвоздевым и развитый в работах Т.И. Барановой на основе общего анализа результатов испытаний бетонных образцов, железобетонных элементов и конструкций.

Расчетный критерий, построенный в координатах главных напряжений  $\sigma_1 / R_b$  и  $\sigma_3 / R_{bt}$ , показан на рис. 3. Высота вертикального участка характеризует интенсивность перераспределения напряжений в результате неупругих деформаций. Расчетный критерий для области сжатие-растяжение записывается формулами:

$$\sigma_3 / R_{bt} = 1 \text{ при } \sigma_1 / R_b \leq 1 - \lambda, \quad (6)$$

$$\sigma_1 / R_b + \lambda \cdot \sigma_3 / R_{bt} = 1 \text{ при } \sigma_1 / R_b > 1 - \lambda, \quad (7)$$

где  $\lambda = 1 - \nu$ ; здесь  $\nu$  – координата точки перелома графика на оси  $\sigma_1 / R_b$ ,  $\nu = 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1; 0$  при повышении класса бетона от В30 до В80 и более.

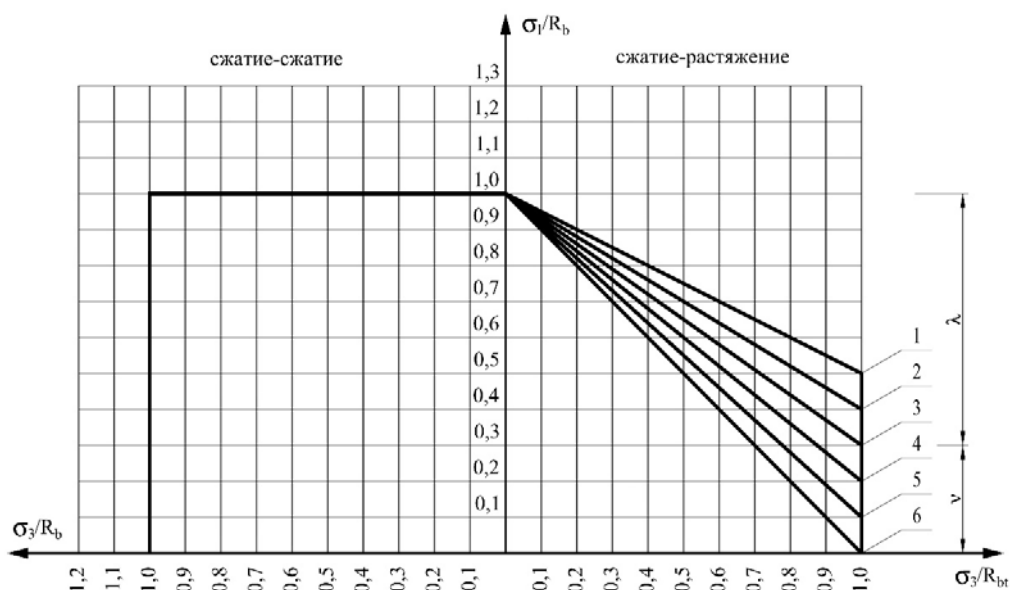


Рис. 3. Расчетный критерий прочности бетона при плоском напряженном состоянии:  
1 – для бетона В30; 2 – для бетона В40; 3 – для бетона В50; 4 – для бетона В60;  
5 – для бетона В70; 6 – для бетона В80

В области сжатие-сжатие расчетный критерий прочности бетона принят:

$$\sigma_1 / R_b = 1. \quad (8)$$

В начальной стадии нагружения, когда растягивающие деформации невелики, образуется несколько трещин с большими расстояниями между ними.

Большие растягивающие деформации при высоких напряжениях приводят к увеличению количества трещин и снижению расстояния между ними.

Процесс трещинообразования, полученный при испытании образцов, имеет изменяющуюся ветвящуюся траекторию, обусловленную неоднородной структурой бетона, что приводит к появлению эксцентриситетов результирующей усилия обжатия в каждой «элементарной полосе», разделенной наклонными трещинами внутри сжатой бетонной полосы.

Внецентренное приложение равнодействующей усилий вызывает неравномерное распределение напряжений по ширине бетонных полос между трещинами.

Бетон, расположенный в районе трещин, оказывается более нагруженным, чем в середине «элементарной полосы». Это различие приводит к раннему разрушению бетона в ослабленной зоне, с перераспределением напряжений в более прочные области. Этот эффект выравнивает напряжения по ширине сжатой полосы, поэтому при расчетах принято рассматривать средние напряжения и деформации. Средние напряжения и деформации в бетоне – это усредненные деформации на некоторой базовой длине, ориентированной поперек нескольких трещин, включая собственно деформации, связанные с раскрытием трещин.

Напряжение бетона сжатию принимается равным  $\gamma_b \cdot R_b$  и равномерно распределенным по ширине сжатой бетонной полосы, как это принято в нормах проектирования СП 63.13330.2018, где  $\gamma_b$  – коэффициент, учитывающий снижение прочности бетона в напряженном состоянии «сжатие-растяжение».

Расчетные зависимости для определения критерия прочности бетона в зависимости от касательных  $\tau_{xy}$  и нормальных  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  напряжений записываются следующими формулами:

в области «сжатие – растяжение»

$$m \cdot (\tau_{xy} / R_{bt}) \cdot 2 - \frac{1}{m} \cdot (\sigma_x / R_b) \cdot (\sigma_y / R_b) - (\sigma_x / R_b - \sigma_y / R_b) = 0, \quad (9)$$

$$m \cdot (\lambda - m)^2 \cdot (\tau_{xy} / R_{bt})^2 + \lambda \cdot ((\sigma_x / R_b)^2 - (\sigma_y / R_b)^2) - \frac{(\lambda^2 + m^2)}{m} \cdot (\sigma_x / R_b) (\sigma_y / R_b) - (\lambda \cdot m) \cdot (\sigma_x / R_b + \sigma_y / R_b) - m = 0; \quad (10)$$

в области «сжатие – сжатие»

$$v^2 \cdot (\tau_{xy} / R_{bt} - \sigma_x / R_b \cdot \sigma_y / R_b + \sigma_x / R_b + \sigma_y / R_b) - 1 = 0, \quad (11)$$

где  $m = R_{bt} / R_b$ .

Графическое объяснение расчетного критерия прочности бетона в координатах  $\tau_{xy} / R_{bt}$  и  $\sigma_x / R_b$  при различных значениях  $\sigma_y / R_b$  представлено на рис. 4. При значительных напряжениях  $\sigma_y$  касательные напряжения резко возрастают [4].

$$\tau_{xy, \lim}^{\max} = \frac{1}{m} \cdot \sqrt{\sigma_y / R_b - (\sigma_y / R_b)^2} \cdot R_{bt}. \quad (12)$$

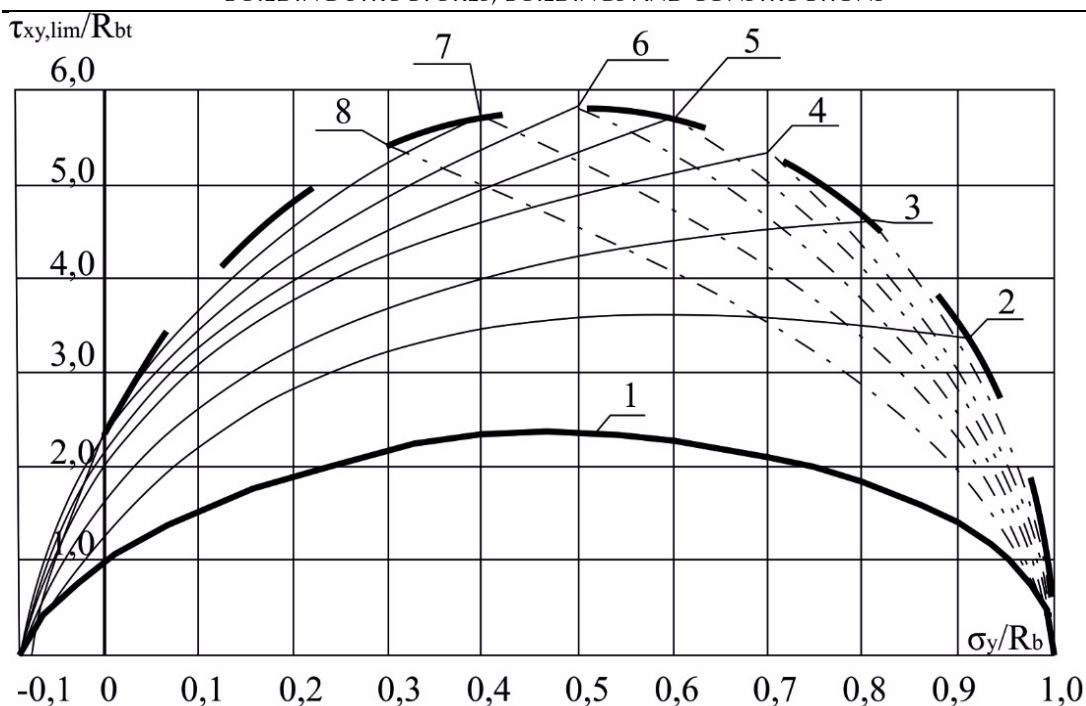


Рис. 4. Расчетный критерий прочности бетона при плоском напряженном состоянии в координатах нормальных и касательных напряжений:

1 –  $\sigma_y / R_b = 0,2$ ; 2 –  $\sigma_y / R_b = 0,1$ ; 3 –  $\sigma'_y / R_b = 0,2$ ; 4 –  $\sigma_y / R_b = 0,3$ ;

5 –  $\sigma_y / R_b = 0,4$ ; 6 –  $\sigma_y / R_b = 0,5$ ; 7 –  $\sigma_y / R_b = 0,6$ ; 8 –  $\sigma_y / R_b = 0,7$

Предельные касательные напряжения бетона сжатой полосы при срезе равны:

$$\tau_{xy, \text{lim}} = \gamma_{\tau} \cdot R_{bt}, \quad (13)$$

где  $\gamma_{\tau}$  – коэффициент предельных напряжений в зависимости от касательных  $\tau$  и нормальных  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  напряжений.

Исследования показывают, что напряжения сдвига (среза) по высоте сечения изменяются, как правило, по зависимости, близкой к параболической.

Согласно СП 63.13330.2018, напряжения бетона срезу принимаются равномерно распределёнными по высоте сечения среза, как это принято в нормах проектирования.

Ввиду сложности установления величины напряжений в каждой точке пространственного элемента при испытании натуральных образцов в практических расчетах используют компьютерные (численные) модели [4, 5].

#### Выводы:

1. Выявлен эффект разупрочнения бетона в наклонной сжатой полосе, который зависит от нарастающего развития растягивающих деформаций в поперечном направлении.

2. При оценке напряженно-деформированного состояния и выявлении схемы разрушения сжатых бетонных полос предлагается использовать критерии прочности, учитывающие соотношения главных сжимающих и растягивающих напряжений.

#### Список литературы

1. Комаров, В.А. Прочность сжатых полос бетона консольных опор ригелей с подрезкой / В.А. Комаров, О.В. Болдырева // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 3. – С.105–112.

2. Карпенко, Н.И. К построению общих критериев деформирования и разрушения железобетонных элементов/ Н.И. Карпенко // Бетон и железобетон. – 2012. – №5. – С.19–24.

3. Ключева, Н.В. Проблемные задачи развития гипотез механики разрушения применительно к расчету железобетонных конструкций / Н.В. Ключева, В.И. Колгунов, Н.А. Яковенко // Вестник КГАСУ. – 2014. – № 3. – С.41–45.
4. Комаров, В.А. Напряженно-деформированное состояние консольных опор балок с подрезкой / В.А. Комаров, О.В. Болдырева, А.Ю. Трегуб // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 3. – С.95–102.
5. Ласьков, С.Н. Напряженное состояние опорной зоны балок сборно-монолитных узлов со скрытой консолью / С.Н. Ласьков // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 2(55). – С. 96–105.

#### References

1. Komarov, V.A. The strength of compressed concrete strips of cantilever crossbar supports with trimming / V.A. Komarov, O.V. Boldyreva // Regional architecture and engineering. – 2017. – No. 3. – P.105–111.
2. Karpenko, N.I. On the construction of general criteria for deformation and destruction of reinforced concrete elements / N.I. Karpenko // Concrete and reinforced concrete. – 2012. – No.5. – P.19–24.
3. Klyueva, N.V. Problematic problems of the development of hypotheses of fracture mechanics in relation to the calculation of reinforced concrete structures / N.V. Klyueva, V.I. Kolgunov, N.A. Yakovenko // Bulletin of KGASU. – 2014. – No. 3. – P.41–45.
4. Komarov, V.A. Stress-strain state of cantilever supports of beams with trimming / V.A. Komarov, O.V. Boldyreva, A.Yu. Tregub // Regional architecture and engineering. – 2017. – No. 3. – P.95–102.
5. Laskov, S.N. The stressed state of the support zone of beams of prefabricated monolithic units with a hidden console / S.N. Laskov // Regional architecture and engineering. – 2023. – № 2(55). – P. 96–105.

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Зернов Владимир Викторович**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Механика»

**Зайцев Михаил Борисович**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Механика»

**Агафонкина Наталья Викторовна**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры ЭОиУП

*Penza State University of Architecture and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Zernov Vladimir Victorovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the Department «Mechanics»

**Zaytsev Mihail Borisovich**,  
Candidate of the Sciences, Associate Professor  
of the Department «Mechanics»

**Agafonkina Natalia Viktorovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the Department EOiUP

## МЕТОДИКА ПРАКТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА И ПРОВЕРКИ УСТОЙЧИВОСТИ ПОПЕРЕЧНЫХ РАМ КАРКАСА СО СТУПЕНЧАТЫМИ СТОЙКАМИ С УЧЕТОМ ЕГО ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РАБОТЫ

В.В. Зернов, М.Б. Зайцев, Н.В. Агафонкина

Действительные величины усилий и напряжений, а также горизонтальных перемещений пространственной системы получаются, как правило, значительно ниже величин, рассчитанных в предположении раздельной работы плоских рам, благодаря наличию продольных конструкций.

Значение критической нагрузки для таких систем очень чувствительно к возможному горизонтальному смещению ригеля, зависящему от коэффициента упругой податливости. Поэтому возникает необходимость учета пространственной работы поперечной рамы при проверке ее общей устойчивости.

При статических расчетах поперечных рам учет пространственной работы каркаса ведется при помощи коэффициента  $\alpha_{пр}$ , а при проверке устойчивости с использованием расчетных длин отдельных ступеней колонн пространственная работа каркаса совсем не учитывается.

Приведена методика практического метода расчета и проверки устойчивости поперечных рам каркаса с учетом его пространственной работы.

Представлены зависимости между основными расчетными параметрами, учитывающими пространственную работу каркаса промышленных зданий.

*Ключевые слова: промышленное здание, стальной каркас, пространственная работа каркаса, расчет на устойчивость, коэффициент упругой податливости, коэффициент пространственной работы*

## THE METHOD OF PRACTICAL CALCULATION AND VERIFICATION OF THE STABILITY OF THE TRANSVERSE FRAMES OF A FRAME WITH STEPPED RACKS, TAKING INTO ACCOUNT ITS SPATIAL OPERATION

V.V. Zernov, M.B. Zaitsev, N.V. Agafonkina

The actual values of forces and stresses, as well as horizontal displacements of the spatial system, are obtained as a rule significantly lower than the values calculated under the assumption of separate operation of flat frames, due to the presence of longitudinal structures. The value of the critical load for such systems is very sensitive to the possible horizontal displacement of the crossbar, depending on the coefficient of elastic compliance. Therefore, it is necessary to take into account the spatial



operation of the transverse frame when checking its overall stability. In static calculations of transverse frames the spatial work of the frame is taken into account using a coefficient  $\alpha_{пр}$ , and when checking stability using the calculated lengths of individual column steps, the spatial work of the frame is not taken into account at all. The methodology of the practical method of calculating and checking the stability of the transverse frames of the frame, taking into account its spatial operation, is given. The dependencies between the main design parameters taking into account the spatial operation of the frame of industrial buildings are given.

*Keywords: industrial building, steel frame, spatial work of the frame, calculation of stability, coefficient of elastic compliance, coefficient of spatial work*

Известно, что точный расчет пространственного каркаса одноэтажного промздания с проверкой устойчивости при различных видах нагрузок (вертикальных и горизонтальных) может быть выполнен только с помощью специальных программных комплексов [1]. При этом в качестве расчетной схемы принимается пространственная стержневая система в виде блока (рис. 1) из 5–7 плоских поперечных рам (рис. 1), соединенных на уровне ригеля и подкрановых конструкций, моделируемых продольными элементами конечной жесткости.

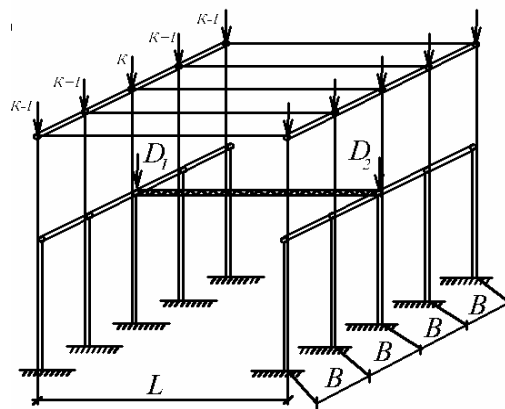


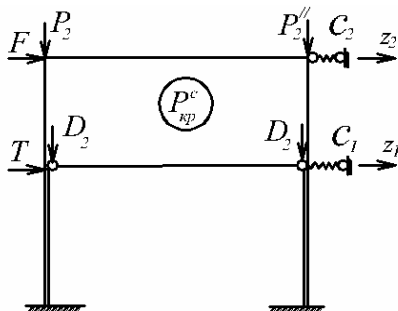
Рис. 1. Расчетная схема пространственного каркаса

Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что действительные величины усилий и напряжений, а также горизонтальных перемещений пространственной системы получаются, как правило, значительно ниже величин, рассчитанных в предположении раздельной работы плоских рам, благодаря наличию продольных конструкций [2, 3].

Наибольшие усилия в продольных конструкциях каркаса вызывает крановая нагрузка. Собственный вес конструкции покрытия, снег и ветер при одинаковой жесткости всех рам в продольном направлении никакого перераспределения усилий в них не вызывает.

Расчет поперечных рам с учетом пространственной работы сводится к расчету плоской рамы, имеющей на уровне ригеля упругую опору, уменьшающую горизонтальное перемещение ригеля (рис. 2, а, б).

а



б

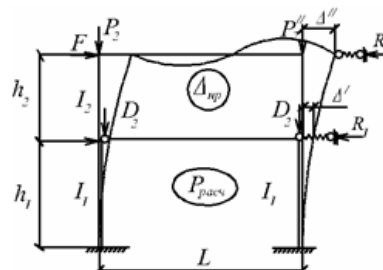


Рис. 2. Упрощенная расчетная схема рамы при расчете на устойчивость

Значение критической нагрузки для такой рамы очень чувствительно к возможному горизонтальному смещению ригеля, зависящему от коэффициента упругой податливости  $C_2$ . Таким образом, необходимость учета пространственной работы поперечной рамы при проверке ее общей устойчивости еще больше возрастает по сравнению с расчетом на прочность.

Если при статических расчетах поперечных рам [4, 5] учет пространственной работы каркаса ведется при помощи коэффициента  $\alpha_{пр}$ , то при проверке устойчивости с использованием расчетных длин отдельных ступеней колонн пространственная работа каркаса совсем не учитывается.

При разрезных подкрановых балках и тормозных конструкциях величина отпора в местах крепления их к колоннам (на уровне верха отметки балки) незначительна и практически не влияет на величину и распределение усилий. Поэтому в расчетной схеме рамного блока упругоподатливую связь  $C_1$  на уровне подкрановых балок можно не учитывать. Такая рама с упругоподатливыми связями только на уровне ригеля представлена на рис. 3.

Принятое допущение дает возможность получить аналитическую зависимость коэффициента  $C_2$  с используемым коэффициентом  $\Delta_{пр}$ , учитывающим пространственную работу каркаса.

Приведем вывод зависимости между  $C_2$  и  $\alpha_{пр}$  для плоской рамы со ступенчатыми стойками (рис. 3) при действии расчетных нагрузок  $F$ ,  $P$  и  $D$ . Для этой рамы отношения  $\alpha_{пр} = \Delta_{пр} / \Delta_2$ , выраженные через перемещения ригеля, можно назвать коэффициентом пространственной работы.

В этом равенстве:

$\Delta_{пр}$  – перемещение ригеля рамы “к” в пространственном блоке;

$\Delta = \Delta_2$  – перемещение ригеля плоской рамы, соответствующее вычислениям от действия расчетных нагрузок (условно обобщены  $F$ ).

Для этого случая нагружения справедливо равенство

$$\alpha_{пр} = \Delta_{пр} / \Delta = 1 - R / F = 1 - \alpha, \quad (1)$$

где  $R = \alpha F$ ;  $R$  – реакция упругоподатливой опоры от действия любой горизонтальной силы  $F$ .

С другой стороны, можно записать  $R = C_2 \Delta_{пр}$ , где  $[C_2] = \text{кН/м}$ , тогда  $\alpha_{пр} = 1 - C_2 \Delta_{пр} / F$ , откуда

$$F = C_2 \Delta_{пр} / (1 - \alpha_{пр}). \quad (2)$$

Последние равенства справедливы при:

$$C_2 = 0, F = 0 \text{ и } R = 0, \text{ при } C_2 = \infty, R = \infty,$$

при  $\Delta_{пр} = 1$ , чему соответствует  $Z_2 = 1$  – по методу перемещений равенства (2) можно записать

$$F = r_{22}^C = r_{22}^0 + C_2 = C_2 / (1 - \alpha_{пр}).$$

Из последнего равенства получаем общее выражение для коэффициента упругой связи на уровне ригеля рамы:

$$C_2 = r_{22}^0 (1 - \alpha_{пр}) / \alpha_{пр}, \quad (3)$$

где  $r_{22}^0$  – реакция в линейной связи на уровне ригеля от  $\Delta_{пр}'' = Z_2 = 1$ .

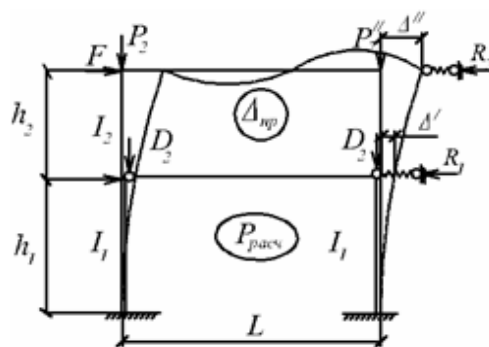


Рис. 3. Упрощенная расчетная схема рамы с упругоподатливыми связями только на уровне ригеля

Значение  $r_{22}^0$  – выражает жесткость заданной рамы горизонтальным перемещениям на уровне ригеля. Для определения этой реакции могут быть использованы приближенные формулы, в частности для ступенчатой стойки со свободным концом:

$$r_{22}^0 = 3EI_n / H^3 c, \text{ где } c = 1 + \alpha^3 \mu. \quad (3, a)$$

Здесь коэффициент  $c$  учитывает переменность сечения.

Для ступенчатой стойки с защемленным, но подвижным верхним концом (2-й случай) формула для определения  $r_{22}^0$  в развернутом виде имеет вид:

$$r_{22}^0 = \frac{12 \cdot \left[ 1 + \frac{h_1}{H} \left( \frac{I_1}{I_2} - 1 \right) \right] \cdot EI_1 / H^3}{4 \left[ 1 + \frac{h_2}{H} \left( \frac{I_1}{I_2} - 1 \right) \right] \cdot \left[ 1 + \left( \frac{h_2}{H} \right)^3 \cdot \left( \frac{I_1}{I_2} - 1 \right) \right] - \left[ 1 + \left( \frac{h_2}{H} \right)^3 \left( \frac{I_1}{I_2} - 1 \right) \right]^2} \cdot 3. \quad (3, б)$$

В таком виде эта формула более приемлема при составлении программы для проверки общей устойчивости поперечной рамы с учетом пространственной работы с использованием выражения  $C_2$  по (3).

В формуле (3) коэффициент упругого отпора  $\alpha_{np}$ , а далее коэффициент  $C_2$  можно определить по таблицам в зависимости от параметра  $\beta$ , характеризующего соотношения жесткостей поперечной рамы и покрытия:

$$\beta = B^3 \sum I_n d / H^3 I_n, \quad (4)$$

где  $B$  – шаг поперечных рам;  $H$  – высота колонны;  $\sum I_n$  – сумма моментов инерции нижних частей колонн;  $d$  – коэффициент, с помощью которого учитывается переменность сечения колонны;  $I_n = I_{св} + I_{кр}$  ( $I_{св}$  – момент инерции продольных связей по нижним поясам;  $I_{кр}$  – эквивалентный момент инерции дисков покрытия).

Продольные элементы покрытия можно рассматривать как неразрезные балки, опирающиеся на поперечные рамы, которые достаточно принять равными пяти в блоке каркаса; тогда получается четырехпролетная балка на упругих опорах (рис. 4).

Более точное решение получается с учетом влияния загрузки смежных рам крановой нагрузкой. Для практических расчетов достаточно рассмотреть влияние загрузки двух смежных рам по отношению к исследуемой (рис. 5), при этом величину упругого отпора находим с учетом ординат линии влияния по формуле

$$\alpha_{np} = 1 - \alpha - \alpha' (n_0 / \sum y - 1), \quad (5)$$

где  $\sum y$  – сумма ординат л.в. реакции рассматриваемой рамы;  $n_0$  – число колес кранов на одной нитке подкрановой балки;  $\alpha'$  – числовой коэффициент, зависящий от  $\beta$  по (5).

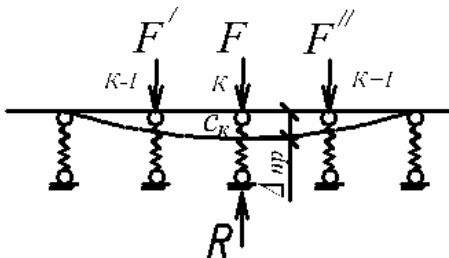


Рис. 4. Четырехпролетная балка на упругих опорах

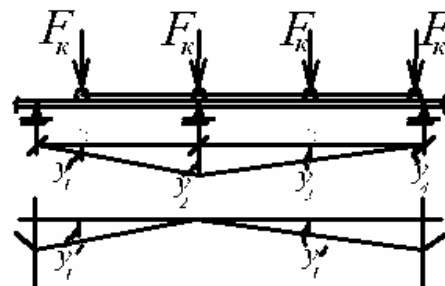


Рис. 5. Загрузка смежных рам крановой нагрузкой

Формула (3) для определения коэффициента упругой связи  $C_2$ , учитывающего пространственную работу поперечной рамы каркаса, несколько отличается от формулы, предложенной А.Н. Гениевым и Е.И. Беленя:

$$\gamma = \frac{1}{u} \cdot \frac{h_2^3}{EI_2} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot \frac{1}{d} \left( \frac{h_2}{h_1+h_2} \right)^3 \frac{I_1}{I_2}. \quad (6)$$

Здесь  $\gamma$  – безразмерный коэффициент упругого отпора ригеля рамы горизонтальному смещению;  $\alpha$  и  $d$  – параметры, определяемые по графикам в зависимости от геометрических размеров рамы  $n = h_2 / h_1$ , от числа рам в блоке и от коэффициента  $\beta$  по (4).

Существенным недостатком этой формулы, по сравнению с предложенной формулой (3), является то, что она применима для учета пространственной работы только симметричной однопролетной рамы. В ней  $I_1$  и  $I_2$  – моменты инерции нижней и верхней ступеней колонн рамы. Она не учитывает также изгибную жесткость решетчатого ригеля  $EI_p$ .

Полученная авторами формула (3) более общая, ее можно применить для любой одноэтажной рамы как со ступенчатыми стойками, так и с их постоянным сечением. Особенно она удобна при расчете поперечной рамы с использованием ПЭВМ, так как по соответствующей программе будут определяться элементы матрицы жесткости, включая  $r_{22}^0$ . Поэтому при численном значении  $\alpha_{np}$ , вычисленном по (5), легко получается коэффициент упругой горизонтальной связи  $C_2$  на уровне ригеля рамы.

После определения коэффициента упругой связи  $C_2$  по формуле (3) расчет рамы на устойчивость может быть выполнен на ПЭВМ по соответствующей программе или же известным методом перемещений с использованием вспомогательных таблиц для реакций  $r_{jk}^N$  от единичных перемещений. Для такой симметричной рамы (см. рис. 3) неизвестными перемещениями будут:

$Z_1$  – горизонтальное перемещение для уровня ступени (горизонтальной связи, имитирующей мостовой кран);

$Z_2$  – перемещение ригеля;

$Z_3$  – поворот сечений на уровне ступеней колонн;

$Z_4$  – поворот узлов на уровне ригеля.

Для определения критического параметра продольных сил

$$v_2 = \sqrt{\frac{N_2 h_2^2}{EI_2}} \sqrt{\frac{Ph}{i_2}} \quad (7)$$

необходимо составить и раскрыть определитель 4-го порядка

$$D(R) = D[r_{jk}(v_2, i_k)] = 0. \quad (8)$$

### Выводы

1. Получена зависимость между коэффициентом пространственной работы  $\alpha_{np}$  и коэффициентом упругой податливости  $C_2$  для расчета рам пространственного каркаса на устойчивость.

2. Полученная зависимость применима для любой одноэтажной рамы как со ступенчатыми стойками, так и с их постоянным сечением.

### Список литературы

1. Зернов, В.В. Методика расчета стальных рам промышленных зданий с использованием различных форм потери устойчивости по деформированной схеме / В.В. Зернов, М.Б. Зайцев. – EDN ZKBLJN // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 1(38). – С. 143–148.

2. Золина, Т.В. Вероятностный расчет одноэтажного промышленного здания, оборудованного мостовым краном, с учетом пространственной работы его каркаса / Т.В. Золина. – EDN PEJZSX // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2012. – № 28(47). – С. 7–13.

3. Павелко, А.А. Исследование пространственной работы рамно-связевого каркаса одноэтажного промышленного здания с мостовыми кранами / А.А. Павелко, А.Л. Балушкин. – EDN HGBKVM // Семьдесят третья Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием: сборник материалов конференции: в 2 частях (Ярославль, 20 апреля 2020 года). – Ярославль: Ярославский государственный технический университет, 2020. – Часть 2. – С. 683–686.

4. Зернов, В.В. Определение критической нагрузки внецентренно сжатых колонн двутаврового сечения в упругопластической стадии / В.В. Зернов, М.Б. Зайцев. – EDN ZYL RPV // Моделирование и механика конструкций. – 2020. – № 11. – С. 107–112.

5. Зернов, В.В. Алгоритм итерационного метода деформационного расчета плоских рам одноэтажных промышленных зданий на различные нагрузки и проверка их общей устойчивости / В.В. Зернов, М.Б. Зайцев. – EDN XOPLXF // Моделирование и механика конструкций. – 2018. – № 7. – С. 9.

#### References

1. Zernov, V.V. Methodology for calculating steel frames of industrial buildings using various forms of loss of stability according to a deformed scheme / V.V. Zernov, M.B. Zaitsev. – EDN ZKBLJN // Regional architecture and engineering. – 2019. – № 1(38). – P. 143–148.

2. Zolina, T.V. Probabilistic calculation of a single-storey industrial building equipped with an overhead crane, taking into account the spatial operation of its frame / T.V. Zolina. – EDN PEJZSX // Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. – 2012. – № 28(47). – P. 7–13.

3. Pavelko, A.A. A study of the spatial work of the frame-link frame of a single-storey industrial building with overhead cranes / A.A. Pavelko, A.L. Balushkin. – EDN HGBKVM // Seventy-third All-Russian scientific and technical conference of students, undergraduates and postgraduates of higher educational institutions with international participation: a collection of conference materials, at 2 a.m. (Yaroslavl, April 20 2020). – Yaroslavl: Yaroslavl State Technical University, 2020. –Part 2. – P. 683–686.

4. Zernov, V.V. Determination of the critical load of out-of-center compressed I-beam columns in the elastoplastic stage / V.V. Zernov, M.B. Zaitsev. – EDN ZYL RPV // Modeling and mechanics of structures. – 2020. – No. 11. – P. 107–112.

5. Zernov, V.V. Algorithm of the iterative method of deformation calculation of flat frames of single-storey industrial buildings for various loads and checking their overall stability / V.V. Zernov, M.B. Zaitsev. – EDN XOPLXF // Modeling and mechanics of structures. – 2018. – No. 7. – P. 9.

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Мартышкин Даниил Олегович**,  
ассистент кафедры «Строительные  
конструкции»  
E-mail: historical95@mail.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Martyshkin Daniil Olegovich**,  
Assistant of the department «Building  
Structures»  
E-mail: historical95@mail.ru

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МНОГОРЯДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ВКЛЕЕННЫМИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫМИ ШАЙБАМИ

Д.О. Мартышкин

Рассматривается повышение надежности узловых соединений деревянных конструкций за счет применения различного рода вкладышей. Для обеспечения немагнитности, радиопрозрачности, аутентичности, коррозионной стойкости и уменьшения массы соединений в качестве материала шайб принят стеклотекстолит.

Приводятся результаты моделирования и расчета однорядных и многорядных образцов на клеенных стеклопластиковых шайбах. Рассматривается напряженно-деформированное состояние многорядных соединений деревянных конструкций с учетом конструктивных требований расстановки шайб в деревянном элементе.

*Ключевые слова: деревянные конструкции, соединение, напряженно-деформированное состояние, параметры расстановки, стеклопластик, шайба*

## STRESS-STRAIN STATE OF MULTI-ROW JOINTS OF WOODEN STRUCTURES WITH GLUED FIBERGLASS WASHERS

D.O. Martyshkin

An increase of the reliability of nodal joints of wooden structures using various types of inserts is considered. Fiberglass is used as the washer material to ensure non-magnetism, radio transparency, authenticity, corrosion resistance and weight reduction of joints.

The article presents the results of modeling and calculation of single-row and multi-row samples on glued fiberglass washers. The stress-strain state of multi-row joints of wooden structures is considered, taking into account the design requirements of the arrangement of washers in a wooden element.

*Keywords: wooden structures, connection, stress-strain state, placement parameters, fiberglass, washer*

### Введение

Наиболее распространёнными решениями узловых соединений деревянных конструкций (ДК) являются: клеенные стержни по «системе ЦНИИСК», клеенные пластины, металлические зубчатые пластины (МЗП), шпонки и шайбы [1–8]. На основе достоинств клеенных стальных шайб [9–10] предложено соединение, которое обеспечивает немагнитность, радиопрозрачность, аутентичность соединений ДК и вместе с тем является достаточно прочным соединением с применением клеенных шайб из стеклотекстолита КАСТ-В [11–13]. На основе натуральных испытаний устано-

влены требуемые параметры расстановки клеенных стеклопластиковых шайб в соединениях деревянных конструкций [14].

Далее на основе результатов натурных испытаний, моделирования и расчета необходимо рассмотреть напряженно-деформированное состояние (НДС) элементов однорядных и многорядных соединений с клееными стеклопластиковыми шайбами.

### Параметры расстановки клеенных стеклопластиковых шайб в соединениях деревянных конструкций

Согласно результатам натурных испытаний [15] образцов с клееными шайбами с диаметром ( $D_{ш}$ ) 80 и 100 мм, установлены аналогичные величины деформаций сдвига и несущей способности пары шайб. На этом основании рассмотрим соединения с клееными шайбами с диаметром ( $D_{ш}$ ) 80 мм и толщиной ( $t_{ш}$ ) 10 мм.

В [14] приведены требуемые параметры расстановки клеенных стеклопластиковых шайб в деревянном элементе. Были испытаны образцы с различной расстановкой тензорезисторов (серия ВШ-80-10-МН.Г.Д) при действии кратковременной нагрузки. Для определения напряжений на образцы наклеивались тензорезисторы, которые позволяют измерять деформации вдоль и поперек волокон древесины.

Для анализа НДС элементов соединения, согласно данным натурных испытаний, выполнены моделирование и расчет образцов [16, 17] в программном комплексе Ansys. Нагрузка к образцам приложена согласно испытаниям – до 25 кН (деформации отсутствуют или близки к нулю). Объемная конечно-элементная модель и схема приложения нагрузки показаны на рис. 1. Геометрическая модель построена с использованием внутреннего модуля ANSYS DesignModeler и Discovery, путем выдавливания плоских фигур в тело (Solid). Физические характеристики материалов (древесины и стеклотекстолита) заданы с использованием компонентов системы «Engineering Data», с учетом ортотропии материала в системе координат программы Ansys. Основная сетка разбивки модели задана размером 5 мм.

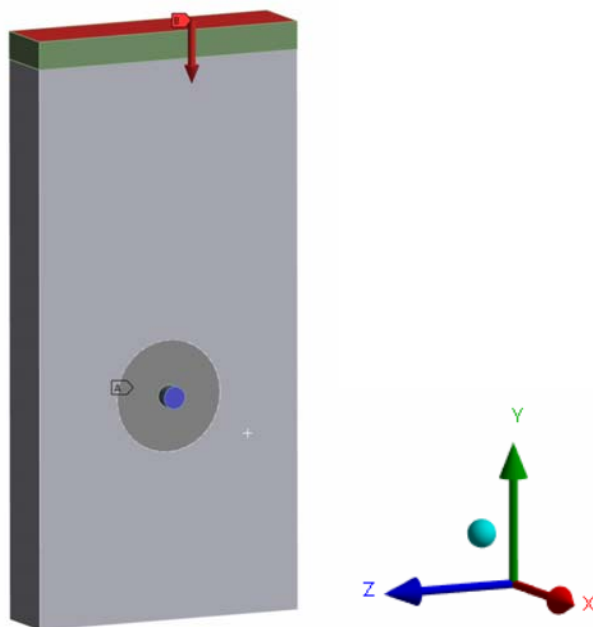


Рис. 1. Объемная конечно-элементная модель и схема приложения нагрузки

Графики распределения напряжений в образцах ВШ-80-10-МН.Г.Д-1, ВШ-80-10-МН.Г.Д-2, ВШ-80-10-МН.Г.Д-3 (рис. 2), согласно натурным испытаниям, имеют выраженную упругую работу.

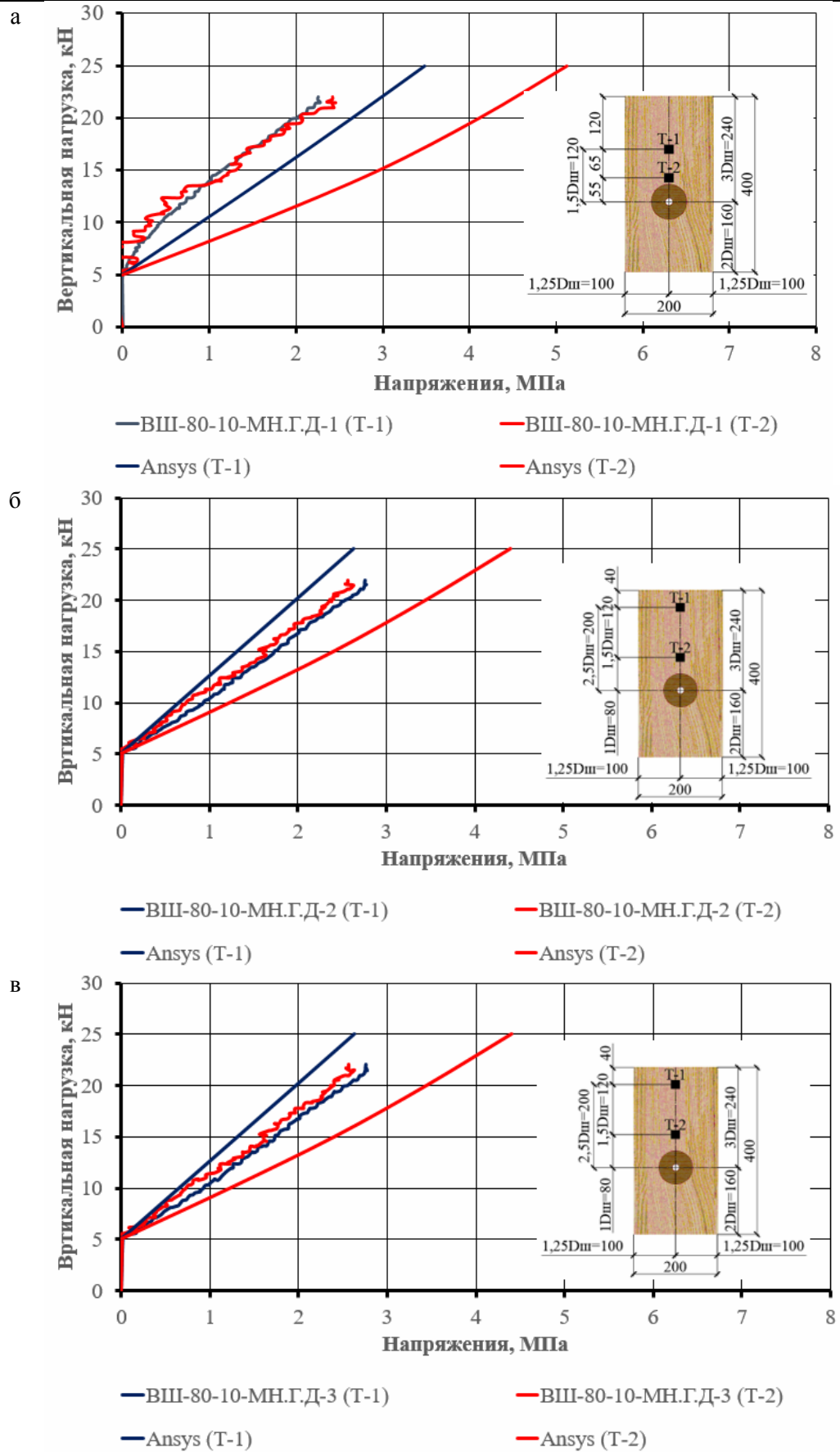


Рис. 2. Напряжения сжатия в образцах:  
 а – ВШ-80-10-МН.Г.Д-1; б – ВШ-80-10-МН.Г.Д-2; в – ВШ-80-10-МН.Г.Д-3



Оказалось, в образцах при увеличении шага расстановки тензорезисторов в продольном направлении значения напряжений в датчиках Т-1, Т-2 различаются незначительно. На этом основании приняты требуемые параметры расстановки шайб в соединении: расстановка шайб в продольном направлении ( $S_1$ ) и между шайбами ( $S_2$ ) вдоль слоев не менее  $3D_{ш}$ ; привязка шайбы в поперечном направлении ( $S_3$ ) поперек слоев не менее  $1D_{ш}$ .

Установлена сходимость результатов натуральных испытаний и расчета образцов в ПК Ansys (расхождение величин напряжений, полученных согласно испытаниям и расчету, не превышает 20 %), что подтверждает правильность выполненной модели и позволяет использовать модель для анализа соединений деревянных конструкций на клеенных стеклопластиковых шайбах.

### Многорядные соединения деревянных конструкций на клеенных стеклопластиковых шайбах

Далее необходимо рассмотреть НДС многорядных соединений ДК с клееными стеклопластиковыми шайбами.

В качестве материала для деревянных элементов образцов принята древесина сосны 2-го сорта (СП 64.13330.2017). Шайбы изготовлены из стеклотекстолита КАСТ-В (ГОСТ 10292-74) по аналогии с однорядными образцами. Приняты образцы с клееными шайбами диаметром ( $D_{ш}$ ) 80 мм и толщиной ( $t_{ш}$ ) 10 мм (рис. 3). Форма и размер образцов приняты с соблюдением шага расстановки шайб  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ . Общий вид и размеры образцов показаны на рис. 3.

Для анализа НДС соединения выполнены моделирование и расчет многорядных образцов в ПК Ansys по аналогии с однорядными. Размеры приняты в соответствии с рис. 3, а. Объемные конечно-элементные модели и схема приложения нагрузки представлены на рис. 3, б. Также приняты характерные линии напряжений (рис. 4).

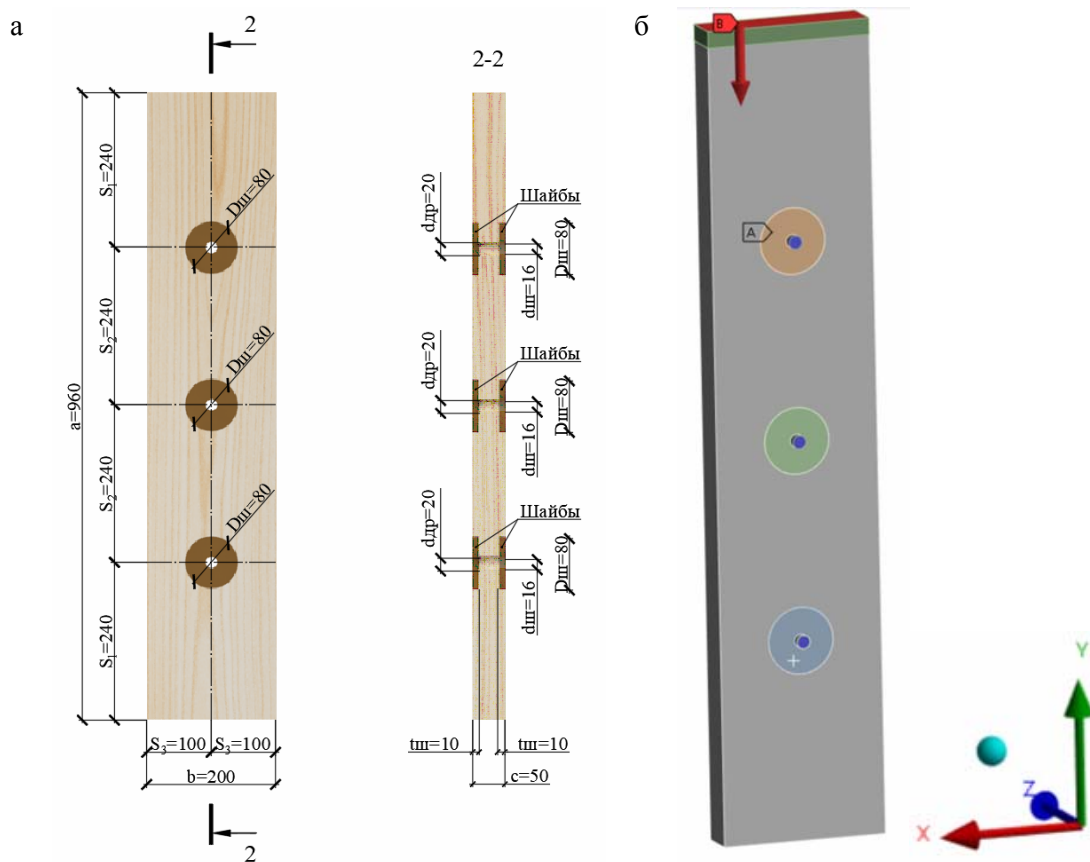


Рис. 3. Общий вид и размеры образца (а), схема приложения нагрузки (б)

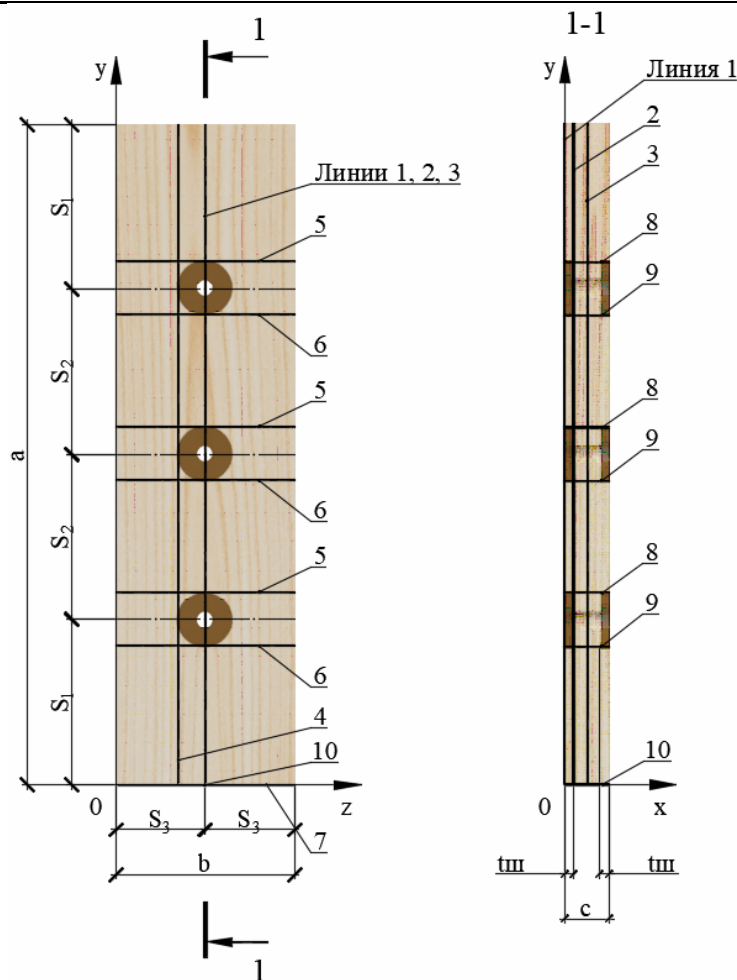


Рис. 4. Характерные линии напряжений

Образцы нагружались ступенчато с шагом 0,5 кН от 0 до 25 кН (упругая работа образцов) и 70,30 кН (разрушающая нагрузка) согласно испытаниям образцов с клееными шайбами диаметром ( $D_{ш}$ ) 80 мм и толщиной ( $t_{ш}$ ) 10 мм [15].

#### Результаты расчета

Результаты расчета приведены в виде изополей перемещений и напряжений (рис. 5–6). Представлены результаты для упругой работы при нагрузке 25 кН и при разрушающей нагрузке – 70,3 кН.

Согласно рис. 5, общий вид деформаций при нагрузках 25 кН и 70,30 кН аналогичен. Величины вертикальных перемещений при упругой работе близки к 0. При разрушающей нагрузке отмечено аналогичное, так как расчет производился методом конечных элементов в упругой стадии работы материала.

Согласно рис. 6, картины распределения изополей напряжений  $\sigma_y$  сжатия в образцах при нагрузках 25 кН и 70,30 кН аналогичны. Максимальные напряжения отмечены в шайбах, их величины не превышают предела прочности стеклотекстолитовых шайб (шайбы не разрушаются).

Для анализа распределения напряжений в деревянном элементе и шайбе выявлены наиболее характерные линии изменения напряжений (см. рис. 4). Рассмотрим распределение напряжений сжатия  $\sigma_y$  по линиям 1, 2, 3 (рис. 7–9).

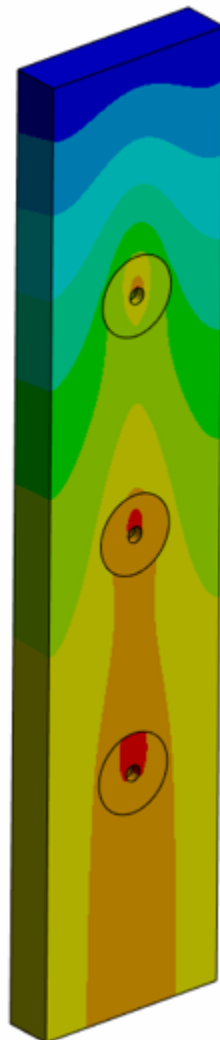
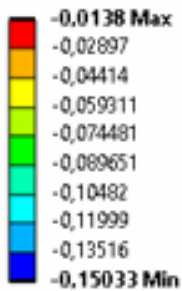
Согласно рис. 7–8, характер распределения напряжений сжатия  $\sigma_y$  в образце по линиям 1, 2 аналогичен. Максимальные напряжения сжатия  $\sigma_y$  возникают в шайбах под болтом, а именно в первой шайбе от верхней точки нагружения (величины напряжений 21,57 МПа и 58,59 МПа по линии 1, 18,01 МПа и 53,85 МПа по линии 2).

Величины напряжений в первой шайбе по линиям 1 и 2 незначительно различаются (величины невязки 16 % и 8 %). Во второй (средней) шайбе величины напряжений 12,50 МПа и 34,25 МПа по первой линии, 11,51 МПа и 28,16 МПа по второй линии так же, как и в первой шайбе, незначительно различаются (величины невязки 18 % и 8 %). Для третьей (нижней) шайбы установлена невязка 16 % и 7 %. Таким образом, значения напряжений в шайбах многорядного образца при 25 кН и 70,3 кН отличаются друг от друга на одну величину. Следует отметить, что значения напряжений для линии 1 выше, чем для линии 2, что объясняется деформациями болта, который передает большее усилие на край шайбы при изгибе.

Также необходимо обратить внимание на распределение напряжений в деревянном элементе. Картины распределения напряжений в деревянном элементе по линиям 1 и 2 аналогичны. Величины напряжений по линии 1, 2 различаются незначительно (не более 10 %).

а

Directional Deformation 2  
Type: Directional Deformation(Y Axis)  
Unit: mm  
Global Coordinate System  
Time: 1 s  
04.12.2024 18:15



б

Directional Deformation 2  
Type: Directional Deformation(Y Axis)  
Unit: mm  
Global Coordinate System  
Time: 1 s  
04.12.2024 18:47

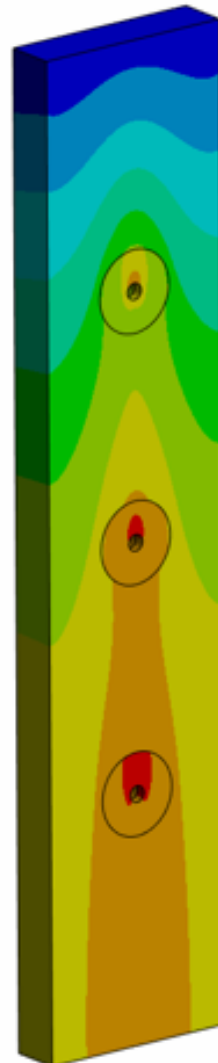
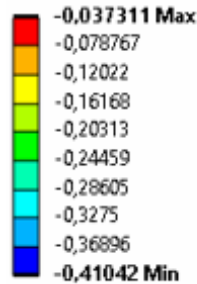


Рис. 5. Изополя перемещений по оси Y в образце при 25 кН (а), 70,3 кН (б)

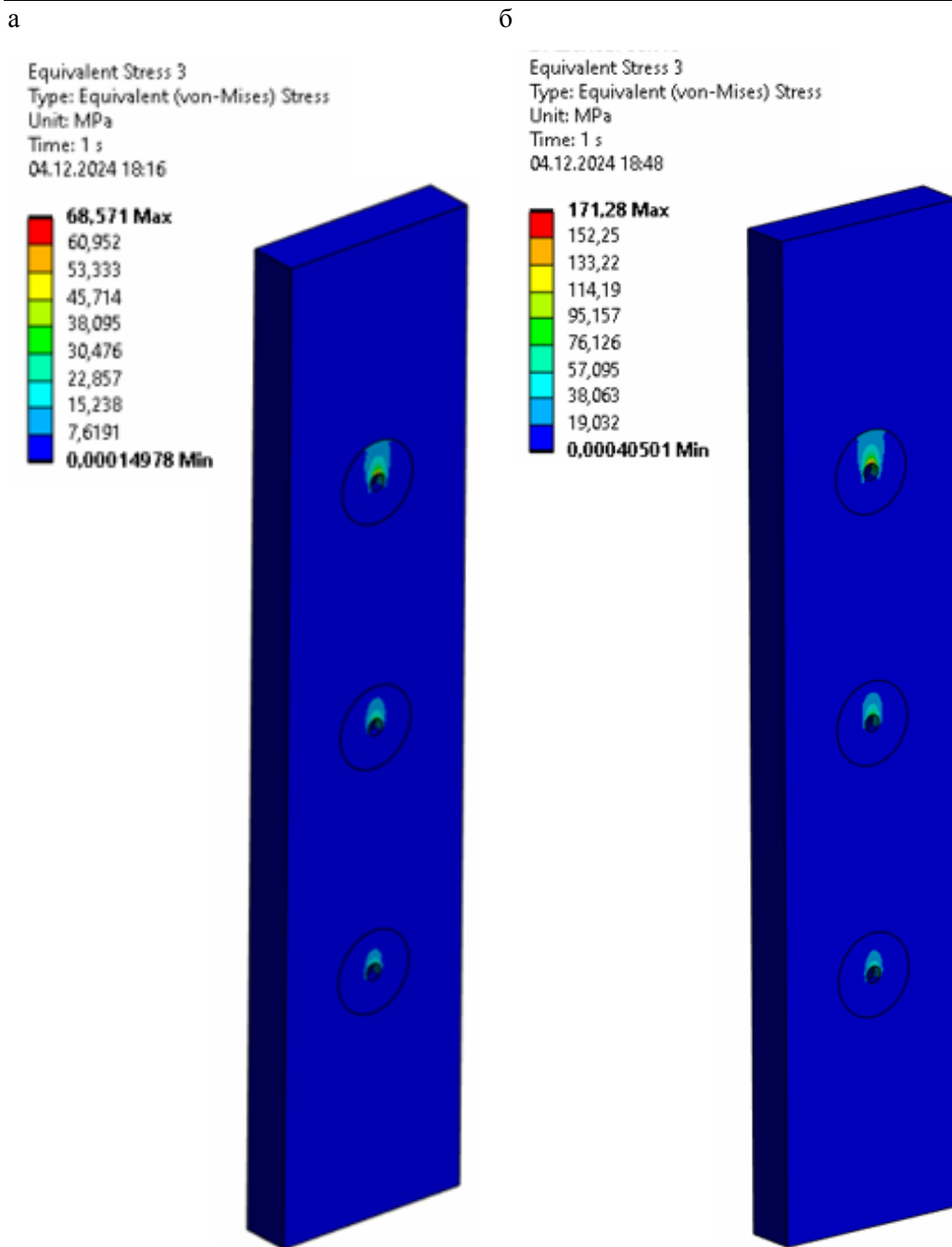


Рис. 6. Изополя напряжений сжатия  $\sigma_y$  в образце при 25 кН (а), 70,3 кН (б)

Напряжения в деревянном элементе, где приложена нагрузка до первой шайбы в точке  $D_{ш}/2$ , максимальны и равны 25,87 МПа по линии 1 и 26,97 МПа по линии 2. Следует отметить, что в точке  $D_{ш}/2$  шайба монолитна с древесиной и распределяет напряжения в древесине. В связи с чем максимальным значением пренебрегаем. На расстоянии от торца деревянного элемента до первой шайбы ( $3D_{ш}$ ) наблюдаем снижение напряжений от точки  $D_{ш}$  до торца доски (величины напряжений не превышают расчетного сопротивления древесины сжатию).

Между первой и второй, второй и третьей шайбами происходит возрастание напряжений от предыдущей шайбы к последующей, и величины напряжений, как отмечено выше, также не превышают расчетного сопротивления древесины сжатию.

От третьей шайбы до нижнего торца древесины установлено снижение напряжений от точки шайба/древесина ( $D_{ш}/2$ ) до 0.

Распределение напряжений сжатия  $\sigma_y$  в образце по линии 3 (см. рис. 9) (рассматривается только деревянный элемент с учетом отверстий по центральной болт/шпилька) аналогично распределению напряжений в древесине по линиям 1 и 2 (рис. 7–8).

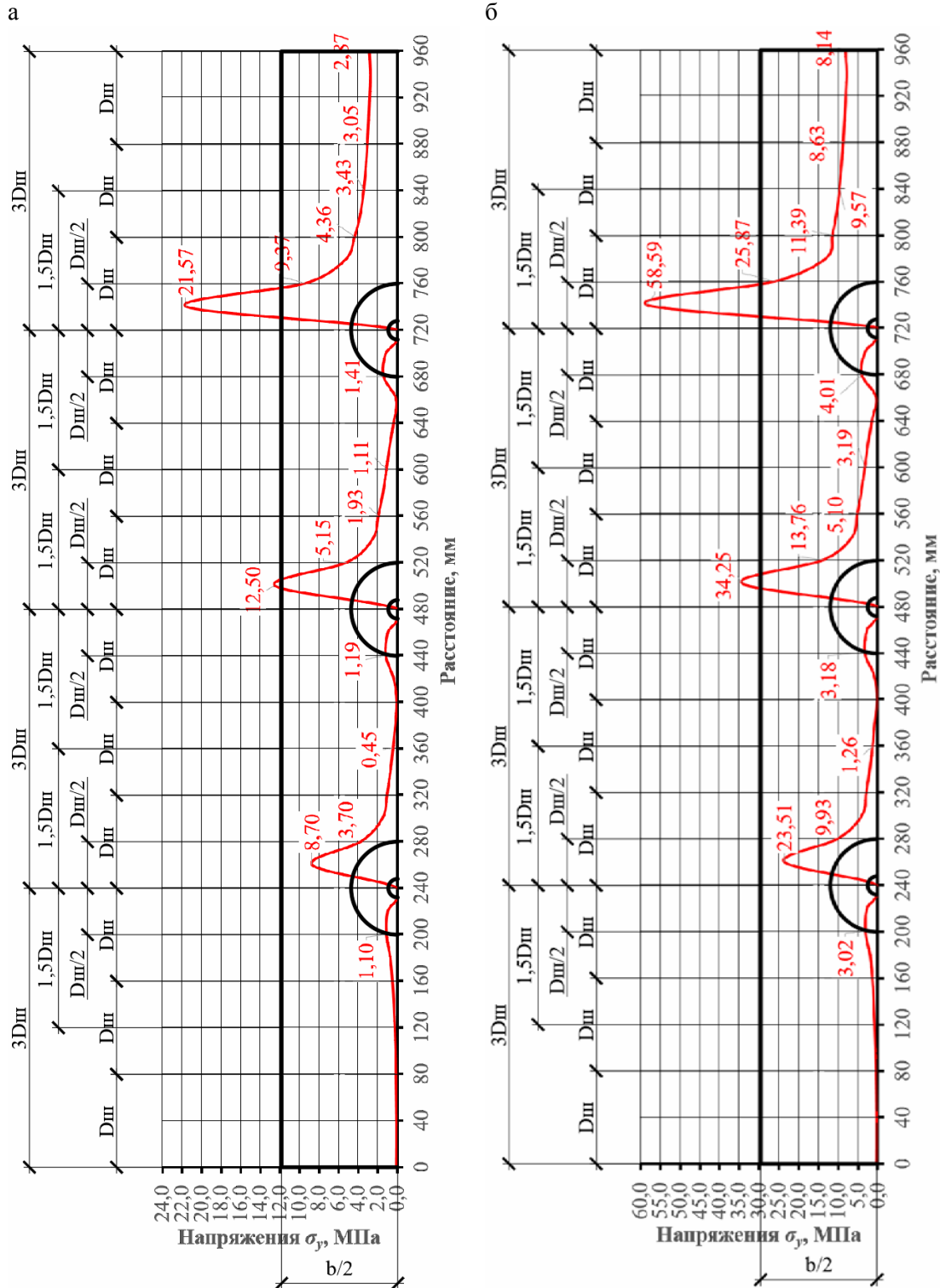


Рис. 7. Распределение напряжений сжатия  $\sigma_y$  в образце по линии 1 при 25 кН (а), 70,3 кН (б)

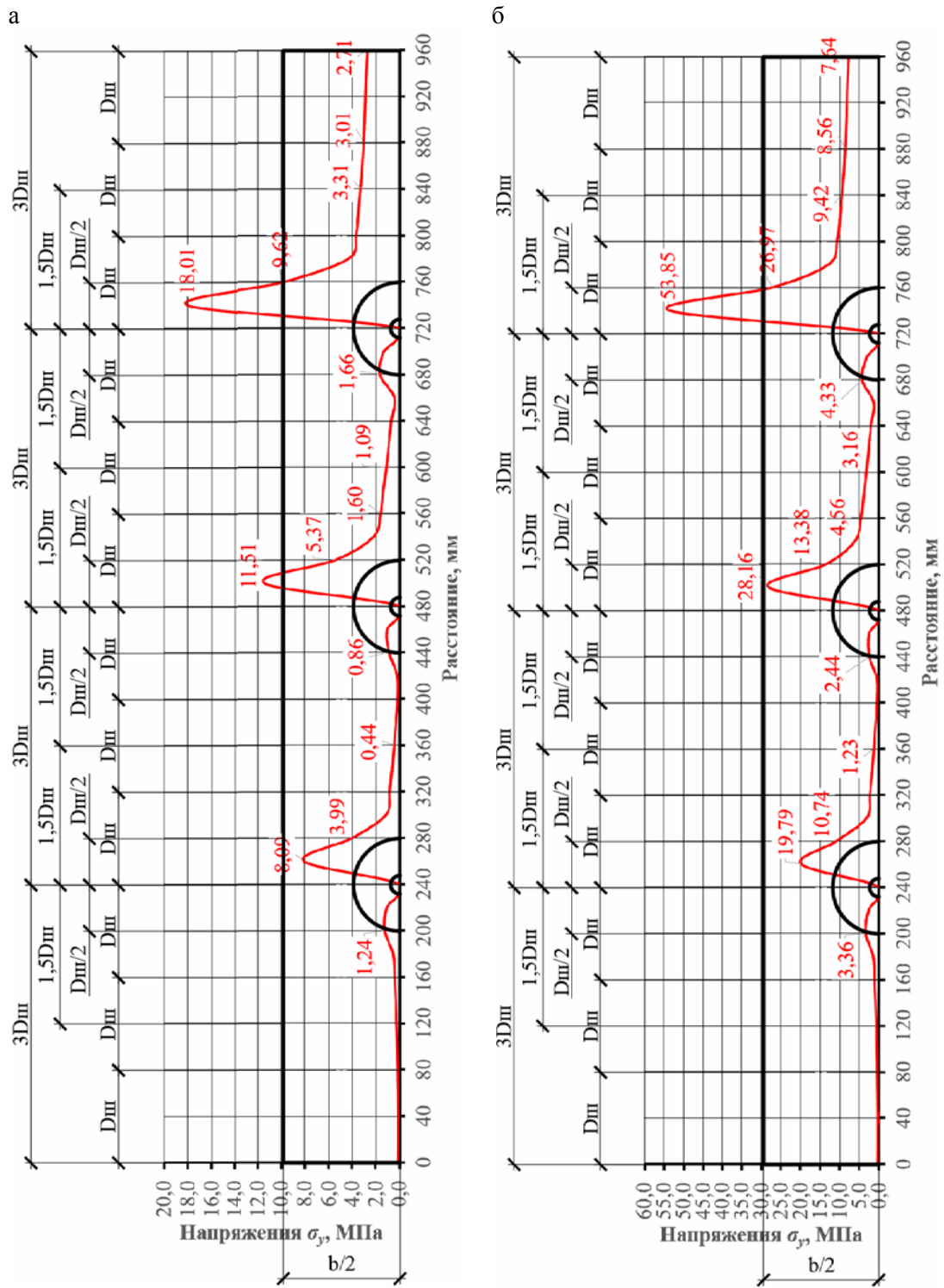


Рис. 8. Распределение напряжений сжатия  $\sigma_y$  в образце по линии 2 при 25 кН (а), 70,3 кН (б)

Таким образом, на основе результатов моделирования и расчета многоядных образцов с вклеенными стеклопластиковыми шайбами получена картина распределения напряжений в деревянном элементе и шайбах, что подтверждается результатами натуральных испытаний.

Результаты натуральных испытаний, моделирования и расчета подтвердили требуемые параметры расстановки шайб в деревянном элементе:

- расстановка шайб в продольном направлении от торца деревянного элемента ( $S_1$ ) и между шайбами ( $S_2$ ) –  $3D_{ш}$ .
- привязка шайб в поперечном направлении  $S_3$  –  $1D_{ш}$ .

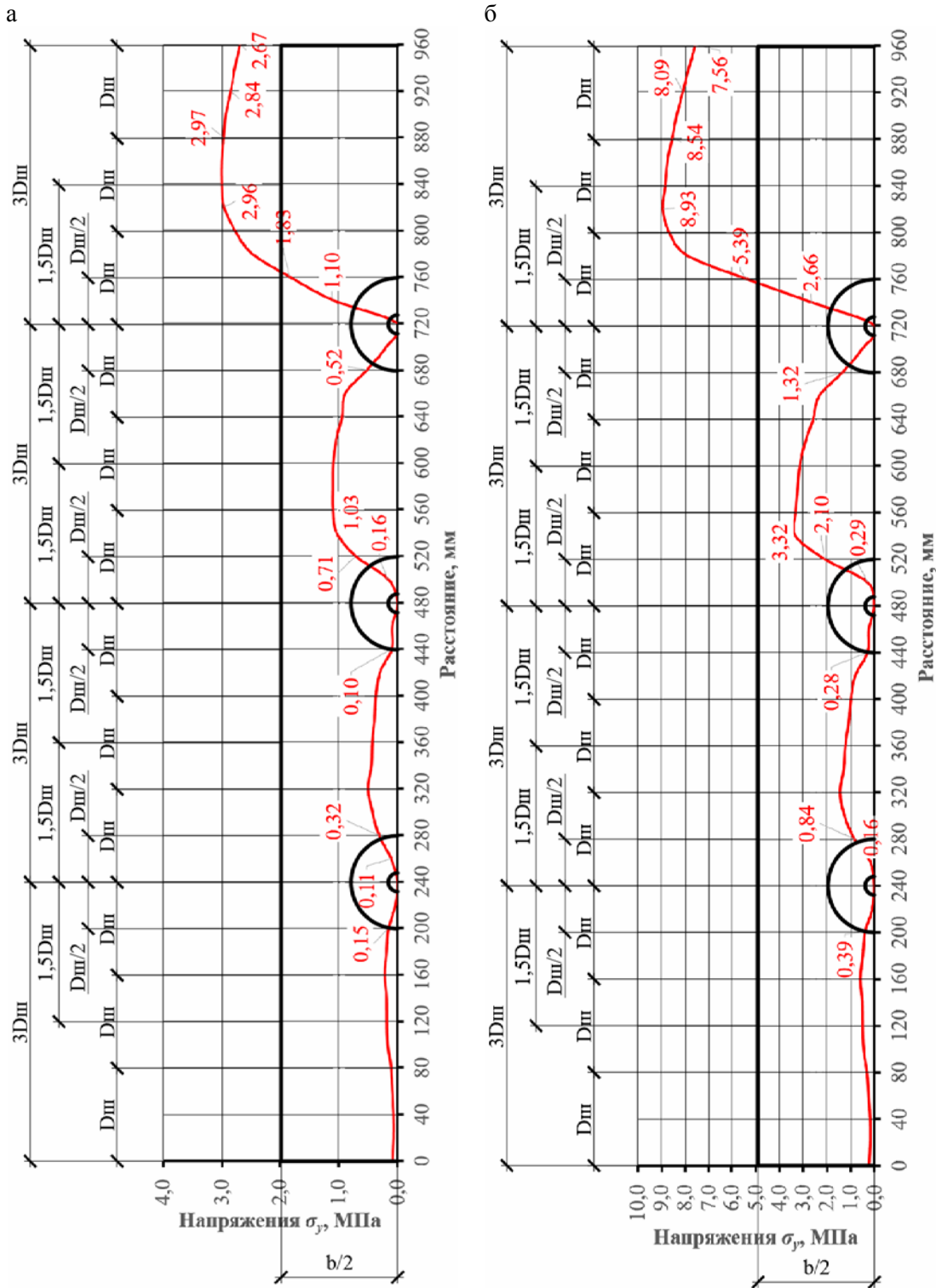


Рис. 9. Распределение напряжений сжатия  $\sigma_y$  в образце по линии 3 при 25 кН (а), 70,3 кН (б)

На основе результатов натурных испытаний, моделирования и расчета опытных образцов установлено, что требуемая влажность древесины не должна превышать 12 %.

#### Выводы

1. Рассмотрено напряженно-деформированное состояние многорядных соединений деревянных конструкций с вклеенными стеклопластиковыми шайбами с учетом конструктивных требований расстановки шайб в деревянном элементе.

2. Определена картина распределения напряжений в деревянном элементе и шайбах на основе результатов моделирования и расчета образцов, согласно которой подтверждены конструктивные параметры расстановки шайб.

### Список литературы

1. Турковский, С.Б. Клееные деревянные конструкции с узлами на клеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК) / С.Б. Турковский, А.А. Погорельцев, И.П. Преображенская. – Москва: РИФ «Стройматериалы», 2013. – 308 с.
2. Вдовин, В.М. Клеенные кольцевые шпонки в соединениях деревянных конструкций / В.М. Вдовин, В.Н. Карпов, М.С. Галахов. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 171 с.
3. Римшин, В.И. Соединения элементов деревянных конструкций на шпонках и шайбах / В.И. Римшин, Б.В. Лабудин, В.И. Мелехов [и др.] // Вестник МГСУ. – 2016. – № 9. – С. 35–50.
4. Попов, Е.В. Испытание на сдвиг элементов деревянных конструкций, соединенных с применением зубчатых шайб «Bulldog» / Е.В. Попов, Б.В. Лабудин, В.И. Мелехов // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. Курск, 2015. – С. 189–198.
5. Аркаев, М.А. Усиление деревянных конструкций с использованием витых крестообразных нагелей / М.А. Аркаев, В.И. Жаданов, Г.А. Столповский // Промышленное и гражданское строительство. – 2017. – №5. – С. 23–29.
6. Линьков, В.И. Конструкции на основе деревянных элементов составного сечения с соединениями на наклонных металлических стержнях без применения клея / В.И. Линьков // Промышленное и гражданское строительство. – Москва, 2012. – № 11. – С. 29–31.
7. Руднев, И.В. Соединения элементов деревянных конструкций с применением клеенных стальных пластин / И.В. Руднев, В.И. Жаданов, С.В. Лисов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск, 2014. – №4. – С. 5–12.
8. Лисицкий, И.И. Деревянные фермы с узловыми соединениями на клеенных плоских стержнях / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов // Промышленное и гражданское строительство. – 2020. – №4. – С. 9–15.
9. Вдовин, В.М. Клеенные металлические шайбы в соединениях деревянных конструкций: монография / В.М. Вдовин, М.В. Арискин, Д.Д. Дудорова. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 184 с.
10. Ишмаева, Д.Д. Жесткие узлы клееных деревянных балочных элементов на клеенных стальных шайбах / Д.Д. Ишмаева, В.М. Вдовин // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2014. – №1. – С. 189–195.
11. Вдовин, В.М. Коррозионно-стойкое немагнитное соединение элементов деревянных конструкций / В.М. Вдовин, Д.О. Мартышкин // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №4(41). – С. 103–108.
12. Арискин, М.В. Соединения на клеенных стеклопластиковых шайбах в деревянных конструкциях / М.В. Арискин, Д.О. Мартышкин // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №2(51). – С. 96–103.
13. Мартышкин, Д.О. Несущая способность соединений деревянных конструкций с клеенными стеклопластиковыми шайбами различной толщины / Д.О. Мартышкин, М.В. Арискин // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – №1(54). – С. 108–114.
14. Мартышкин, Д.О. Расстановка клеенных стеклопластиковых шайб в соединениях деревянных конструкций / Д.О. Мартышкин, М.В. Арискин // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №4(53). – С. 75–83.
15. Мартышкин, Д.О. Несущая способность соединений деревянных конструкций с различными параметрами клеенных стеклопластиковых шайб / Д.О. Мартышкин // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – №3(60) – С. 108–117.
16. Ariskin M.V., Martyshkin D.O., Vanin I.V. Mathematical modeling of stress-strain state of elements of joints of wooden structures on glued fiberglass washers 2021 J. Phys.: Conf. ser. 2131 032095.



17. Колесников, Н.В. Совершенствование расчетов соединений анизотропных конструкционных материалов / Н.В. Колесников, М.В. Аришкин, Д.О. Мартышкин, А.В. Меркушов // Вестник НИЦ «Строительство». – 2024. – №2(41). – С. 69–78.

### References

1. Turkovsky, S.B. Glued wooden structures with joints on glued rods in modern construction (System of TsNIISK) / S.B. Turkovsky, A.A. Pogoreltsev, I.P. Preobrazhenskaya. – Moscow: RIF «Building Materials», 2013. – 308 p.
2. Vdovin, V.M. Ring dowel glued in timber structures joints / V.M. Vdovin, V.N. Karpov, M.S. Halachov. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2011. – 171 p.
3. Rimshin, V.I. Connections of elements of wooden structures on dowels and washers / V.I. Rimshin, B.V. Labudin, V.I. Melekhov [et al.] // MSUCE Bulletin. – 2016. – No 9. – P. 35–50.
4. Popov, E.V. Testing for shear of elements of wooden structures connected using toothed washers «Bulldog» / E.V. Popov, B.V. Labudin, V.I. Melekhov // Safety of the construction industry in Russia. Problems and Solutions. Kursk, 2015. – P. 189–198.
5. Arkaev, M.A. Strengthening of wooden structures using twisted cross-shaped nails / M.A. Arkaev, V.I. Zhadanov, G.A. Stolpovsky // Industrial and Civil Construction. – 2017. – No 5. – P. 23–29.
6. Linkov, V.I. Structures based on composite-section wooden elements with connections on inclined metal rods without using glue / V.I. Linkov // Industrial and Civil Construction. – Moscow, 2012. – No 11. – P. 29–31.
7. Rudnev, I.V. Connections of wooden constructions elements with the use of the pasted steel plates / I.V. Rudnev, V.I. Zhadanov, S.V. Lisov // News of higher educational institutions. Construction. – Novosibirsk, 2014. – No4. – P. 5–12.
8. Lisitsky, I.I. Wooden trusses with nodal joints on glued flat rods / I.I. Lisitsky, V.I. Zhadanov // Industrial and civil engineering. – 2020. – No4. – P. 9–15.
9. Vdovin, V.M. Glued metal washers in the joints of wooden structures: monograph / V.M. Vdovin, M.V. Ariskin, D.D. Dudorova. – Penza: PGUAS, 2012. – 184 p.
10. Ishmaeva, D.D. Rigid connections of glued wooden beam elements on glued steel washers / D.D. Ishmaeva, V.M. Vdovin // Bulletin of Orenburg State University. – 2014. – No1. – P. 189–195.
11. Vdovin, V.M. Corrosion-resistant non-magnetic connection of elements of wooden structures / V.M. Vdovin, D.O. Martyshkin // Regional architecture and engineering. – 2019. – No4(41). – P. 103–108.
12. Ariskin, M.V. Connections on glued fiberglass washers in wooden structures / M.V. Ariskin, D.O. Martyshkin // Regional architecture and engineering. – 2022. – No2(51). – P. 96–103.
13. Martyshkin, D.O. Bearing capacity of wooden structures connections with different thickness of glued fiberglass washers / D.O. Martyshkin, M.V. Ariskin // Regional architecture and engineering. – 2023. – No1(54). – P. 108–114.
14. Martyshkin, D.O. Arrangement of glued fiberglass washers in connections of wooden structures / D.O. Martyshkin, M.V. Ariskin // Regional architecture and engineering. – 2022. – No4(53). – P. 75–83.
15. Martyshkin, D.O. Bearing capacity of joints of wooden structures with various parameters of glued fiberglass washers / D.O. Martyshkin // Regional architecture and engineering. – 2024. – No 3(60) – P. 108–117.
16. Ariskin M.V., Martyshkin D.O., Vanin I.V. Mathematical modeling of stress-strain state of elements of joints of wooden structures on glued fiberglass washers 2021 J. Phys.: Conf. ser. 2131 032095.
17. Kolesnikov, N.V. Improvement of calculations of compounds of anisotropic structural materials / N.V. Kolesnikov, M.V. Ariskin, D.O. Martyshkin, A.V. Merkuhov // Bulletin of the Scientific Research Center «Construction». – 2024. – №2(41). – P. 69–78.

# ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

## ENGINEERING SYSTEMS

УДК 628.3

DOI 10.54734/20722958\_2025\_1\_153

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*  
Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

*Penza State University of Architecture and Construction*  
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Андреев Сергей Юрьевич**,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Водоснабжение,  
водоотведение и гидротехника»  
E-mail: andreev3007@rambler.ru

**Andreev Sergey Yuryevich**,  
Doctor of Sciences, Professor  
of the Department «Water Supply, Sewerage  
and Hydraulic Engineering»  
E-mail: andreev3007@rambler.ru

**Сафронов Максим Александрович**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Водоснабжение, водоотведение  
и гидротехника»  
E-mail: mksafronov@rambler.ru

**Safronov Maxim Aleksandrovich**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of  
the department «Water supply, sewerage and  
hydraulic engineering»  
E-mail: mksafronov@rambler.ru

*Пензенский государственный университет*  
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, д. 40,  
тел.: (8412) 66-64-19

*Penza State University*  
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya St.,  
tel.: (8412) 66-64-19

**Алексеев Дмитрий Петрович**,  
ведущий инженер кафедры «Транспортные  
машины»  
E-mail: alekseev.dim@gmail.com

**Alekseev Dmitriy Petrovich**,  
Lead engineer of the department «Transport  
Vehicles»  
E-mail: alekseev.dim@gmail.com

### ЗАВИСИМОСТЬ СВОЙСТВ ВОДОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ ОТ СТЕПЕНИ ДИСПЕРСНОСТИ ПУЗЫРЬКОВ ВОЗДУХА

С.Ю. Андреев, М.А. Сафронов, Д.П. Алексеев

Приведены результаты теоретического анализа влияния дисперсности пузырьков водовоздушной смеси на процесс их свободного всплывания в поле действия силы гравитации. Показано, что основной характеристикой свойств водовоздушной смеси является константа Лапласа – линейный размер её дисперсной фазы (диаметр пузырька сферической формы в критической точке ламинарного режима всплывания  $d_c = 0,00137$  м). Получены математические зависимости значений основных показателей, характеризующих процессы всплывания воздушных пузырьков в чистой воде в различных режимах, от величины их диаметра.

*Ключевые слова: водовоздушная смесь, константа Лапласа, критическая точка, режим всплывания, дисперсная система, дисперсный размер*

### DEPENDENCE OF WATER-AIR MIXTURES PROPERTIES ON THE DISPERSION DEGREE OF AIR BUBBLES

S.Yu. Andreev, M.A. Safronov, D.P. Alekseev

The results of the theoretical analysis of the effect of dispersion of bubbles of a water-air mixture on the process of their free floating in the field of gravity are presented. It is shown that the main

characteristic of the properties of a water-air mixture is the Laplace constant – the linear size of its dispersed phase (the diameter of a spherical bubble at the critical point of the laminar regime of surfacing is  $d_c=0.00137$  m). Mathematical dependences of the values of the main indicators characterizing the processes of floating air bubbles in clean water in various modes on the size of their diameter are obtained.

*Keywords: water-air mixture, Laplace constant, critical point, floating mode, dispersed system, dispersed size*

Жидкости, содержащие в своем объеме диспергированную газовую фазу (ДГФ, пузырьки газа), являются динамическими дисперсными системами (ДДС), и они широко применяются в технологических процессах очистки сточных вод. Эти процессы протекают в результате взаимодействия двух аквасистем – естественной аквасистемы загрязнений сточных вод (смеси содержащихся в них дисперсных частиц и растворенных загрязнений) и искусственной системы ДГФ, создаваемой в объеме очищаемых сточных вод. Как правило, в технологических процессах очистки сточных вод используются ДДС, представляющие собой водовоздушные смеси, содержащие в своем объеме пузырьки воздуха различной степени дисперсности. Для оптимизации процессов, предусматривающих использование водовоздушных смесей, необходимо учитывать оценку основного показателя дисперсной системы – степени гетерогенности её дисперсной фазы. Гетерогенность системы – свойство, отражающее её неоднородность, наличие межфазовой поверхности, разделяющей раздробленные части (дисперсную фазу), находящиеся в сплошной дисперсной среде. Количественной оценкой степени гетерогенности системы является её дисперсность (раздробленность) – признак, связанный с величиной линейных размеров и особенностями геометрических свойств поверхности дисперсной фазы. Учет показателей степени дисперсности водовоздушной смеси имеет особое значение для оптимизации процесса работы сооружений очистки сточных вод. В качестве основного линейного размера пузырька используется величина его диаметра  $d$ , м. Поскольку поперечное сечение пузырька воздуха всегда является кругом, то величина его диаметра  $d$ , м, определяется через значение максимальной площади его поперечного сечения  $\omega$ , м<sup>2</sup>:

$$d = \sqrt{\frac{4\omega}{\pi}}, \text{ м.}$$

Также в качестве характеристик линейных размеров пузырька воздуха используется величина его характерного размера  $h$ , м, и дисперсного размера  $\delta$ , м.

Величина характерного размера пузырька воздуха определяется как отношение объема пузырька  $W$ , м<sup>3</sup>, к площади его поперечного сечения  $\omega$ , м<sup>2</sup>:

$$h = \frac{W}{\omega}, \text{ м.}$$

Величина дисперсного размера пузырька воздуха определяется как отношение объема пузырька  $W$ , м<sup>3</sup>, к площади его поверхности  $f$ , м<sup>2</sup>:

$$\delta = \frac{W}{f}, \text{ м.}$$

Дисперсный размер  $\delta$ , м, является величиной, обратной величине его удельной поверхности  $f_y = \frac{f}{W} = \frac{1}{\delta}$ , м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>.

Особенности геометрических свойств поверхности пузырька воздуха характеризуют коэффициент формы пузырька  $k_\Phi$  и коэффициент дисперсности пузырька воздуха  $k_d$ .

Коэффициент формы пузырька воздуха определяется как отношение площади его поверхности  $f$ , м<sup>2</sup>, к площади его поперечного сечения  $\omega$ , м<sup>2</sup>:

$$k_\Phi = \frac{f}{\omega}, \text{ м.}$$

Величина коэффициента дисперсности пузырька воздуха определяется как отношение его диаметра  $d$ , м, к величине его дисперсного размера  $\delta$ , м:

$$k_d = \frac{d}{\delta}, \text{ м.}$$

Величина характерного размера пузырька воздуха может быть найдена по формуле

$$h = \frac{W}{\omega} = \frac{W}{f} k_{\phi} = \delta \cdot k_{\phi} = d \frac{k_{\phi}}{k_d}, \text{ м}, \quad (1)$$

откуда 
$$\frac{k_{\phi}}{k_d} = \frac{h}{d}, \text{ м}, \quad (2)$$

и 
$$\delta = \frac{h}{k_{\phi}} = \frac{d}{k_d}, \text{ м}. \quad (3)$$

Были проведены теоретические исследования процессов всплывания в чистой воде пузырьков воздуха и тонкослойных сферических тел, имеющих плотность, близкую к плотности воздуха [1, 2, 3]. На рисунке представлен график зависимости величины скорости свободного всплывания пузырька воздуха  $v$ , м/с, в чистой воде от его диаметра  $d$ , мм, приведенный в работах [1, 2, 3].

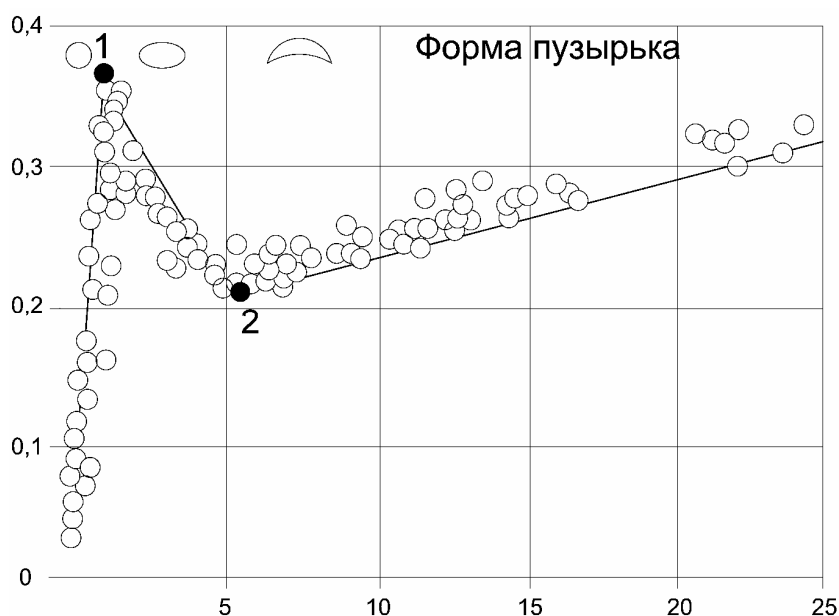


График зависимости величины скорости свободного всплывания пузырька воздуха  $v$ , м/с, в чистой воде от его диаметра  $d$ , мм

На графике имеются критические точки 1 и 2, разделяющие различные режимы всплывания пузырька воздуха. Режим всплывания как пузырька, так и тонкослойного сферического тела определяется численным значением критерия Рейнольдса, являющегося мерой соотношения силы инерции и силы вязкого трения:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (4)$$

где  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости воды ( $\nu = 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ).

Точка 1 на рисунке является граничной точкой, разделяющей ламинарный и турбулентный режимы всплывания пузырька воздуха. В точке 1 пузырек воздуха сохраняет строго сферическую форму. В соответствии с данными, представленными в работе (Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем, 1976), при переходе ламинарного режима движения в турбулентный режим как для твердого сферического тела, так и для сферического пузырька воздуха критерий Рейнольдса имеет критическую величину  $Re_{кр} = 500$ .

На пузырек воздуха, находящийся в объеме воды, действуют выталкивающая сила (сила Архимеда) и сила тяжести. Разность сил, действующих на пузырек воздуха, имеет значение

$$F_d = W (\rho - \rho_v) g = W \cdot \Delta\rho \cdot g, \text{ Н}, \quad (5)$$

где  $g=9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $\rho=998,2 \text{ кг/м}^3$  – плотность чистой воды при температуре  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\rho_v=1,2 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха;  $\Delta\rho = \rho - \rho_v= 997,0 \text{ кг/м}^3$  – разность плотностей воды и воздуха.

В стационарном режиме всплывания пузырька воздуха скорость всплывания имеет постоянную величину, поскольку действующая на пузырек выталкивающая сила  $F_g$  уравнивается силой гидродинамического давления набегающего на пузырек воздуха потока воды  $F_v$ . Возникновение силы гидродинамического давления обусловливается вязкостью среды, в которой всплывает пузырек.

$$F_v = \omega \cdot p_v = \omega \rho \xi \frac{v^2}{2}, \text{ Н}, \quad (6)$$

где  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $\Delta p_v$  – разность давлений на лобовой и кормовой поверхностях всплывающего пузырька, Па;  $\omega$  – площадь поперечного сечения пузырька воздуха,  $\text{м}^2$ .

В точке 1 и справа от неё (график на рисунке) всплывание пузырька воздуха происходит в турбулентном режиме в области равенства действующих на него сил [4, 5, 6]:

$$F_g = F_v = F_\sigma, \text{ Н}, \quad (7)$$

где  $F_\sigma$  – сила поверхностного натяжения пузырька, Н, под действием которой возникает избыточное давление воздуха внутри пузырька

$$\Delta p_\sigma = \frac{2\sigma}{R}, \text{ Па}, \quad (8)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения пузырька воздуха, Н/м;  $R$  – радиус кривизны поверхности пузырька воздуха, м.

$$F_\sigma = \omega \cdot \Delta p_\sigma = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{2\sigma}{R} = \pi d \sigma \frac{d}{2R} = \chi \sigma \frac{d}{2R}, \text{ Н}, \quad (9)$$

где  $\chi$  – смоченный периметр поперечного сечения пузырька воздуха, Н.

В области равенства действующих на всплывающий пузырек сил также выполняется условие

$$\Delta p_v = \Delta p_\sigma, \text{ Па}, \quad (10)$$

$$\rho \xi \frac{v^2}{2} = \frac{2\sigma}{R}, \text{ Па}. \quad (11)$$

Левее точки 1 всплывание сферического пузырька воздуха происходит в ламинарном режиме при условии

$$\Delta p_v < \Delta p_\sigma, \text{ Па}, \quad (12)$$

$$F_g = F_v < F_\sigma, \text{ Н}. \quad (13)$$

В соответствии с данными, представленными на рисунке, в критической точке 1 ламинарного режима всплывания пузырька воздуха сферической формы он имеет величину скорости  $v_c=0,37 \text{ м/с}$ . В этом случае диаметр пузырька воздуха в точке 1 имеет значение

$$d_c = \frac{\text{Re}_{\text{кл}} \cdot v}{v_c} = \frac{500 \cdot 1,01 \cdot 10^{-6}}{0,37} = 0,00137 \text{ м}. \quad (14)$$

Пузырек воздуха сферической формы (в критической точке ламинарного режима 1) имеет следующие величины коэффициента формы  $k_{\text{фс}}$ , коэффициента дисперсности  $k_{\text{дс}}$ , радиуса кривизны поверхности  $R_c$ , м, и характерного размера  $h_c$ , м:

$$k_{\text{фс}} = \frac{f_c}{\omega_c} = \pi d_c^2 \frac{4}{\pi d_c^2} = 4, \quad (15)$$

$$k_{\text{дс}} = \frac{d_c}{\delta_c} = d_c \frac{f_c}{W_c} = d_c \pi d_c^2 \frac{6}{\pi d_c^3} = 6, \quad (16)$$

$$R_c = \frac{1}{2} d_c = \frac{1}{2} \cdot 0,00137 = 0,000685 \text{ м}, \quad (17)$$

$$h_c = \frac{k_{\text{фс}}}{k_{\text{дс}}} d_c = \frac{4}{6} \cdot 0,00137 = 0,00091 \text{ м}. \quad (18)$$

Из условия равенства действующих на сферический пузырек в точке 1 сил (7) следует, что

$$\Delta p_v \omega_c = W_c \Delta \rho g \text{ Н}, \quad (19)$$

откуда 
$$\Delta p = \Delta p_v = \Delta p_\sigma = \frac{W_c}{\omega_c} \Delta \rho g = h_c \Delta \rho g = 0,00091 \cdot 997 \cdot 9,8 = 8,9 \text{ Па}. \quad (20)$$

Из (8) и (20) следует, что

$$\sigma_c = \frac{\Delta p_{\sigma c} \cdot R_c}{2} = \frac{8,9 \cdot 0,000685}{2} = 0,003 \text{ Н}. \quad (21)$$

Пузырек воздуха сферической формы в критической точке всплывания в ламинарном режиме 1 имеет величину коэффициента поверхностного натяжения

$$\sigma_c = \frac{\sigma_{\text{жг}}}{k_{\text{фс}} \cdot k_{\text{дс}}} = \frac{0,073}{4 \cdot 6} = 0,003 \text{ Н}, \quad (22)$$

где  $\sigma_{\text{жг}}=0,073 \text{ Н/м}$  – величина коэффициента поверхностного натяжения границы раздела фаз «вода – воздух».

В соответствии с уравнением (11) величина коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi$  в критической точке 1 имеет значение

$$\xi = \frac{2\sigma_c}{R_c} \cdot \frac{2}{\rho \cdot v_c^2} = \frac{2 \cdot 0,003}{0,000685} \cdot \frac{2}{998,2 \cdot 0,37^2} = 0,13. \quad (23)$$

В стационарном режиме всплывания пузырька воздуха, при условии равенства величин действующих на пузырек выталкивающей силы  $F_d$  и силы гидродинамического давления набегающего потока  $F_v$ , величина градиента давления  $G_{\Delta p}$ , Па/м, набегающего на пузырек потока воды в соответствии с формулами (1) и (20) имеет постоянное значение:

$$G_{\Delta p} = \frac{\Delta p_v}{h} = \frac{h \Delta \rho g}{h} = \Delta \rho g = 997 \cdot 9,8 = 9770 \frac{\text{Па}}{\text{м}} = \text{const}. \quad (24)$$

Из (6) следует, что отношение силы гидродинамического давления  $F_{\Delta p}$  набегающего на пузырек потока к объему пузырька  $W$  равно величине градиента давления  $G_{\Delta p}$  и имеет постоянное значение:

$$G_{\Delta p} = \frac{\Delta p_v}{h} \cdot \frac{\omega}{\omega} = \frac{F_{\Delta p}}{W} = 9770 \frac{\text{Па}}{\text{м}} = \text{const}, \quad (25)$$

откуда следует, что в области равенства действующих на пузырек сил их величина имеет значение

$$F_{\Delta p} = F_v = F_\sigma = \omega \cdot h \cdot G_{\Delta p} = W \cdot G_{\Delta p}, \text{ Н}. \quad (26)$$

Величину соотношения объемной  $E_w$ , Дж, и поверхностной  $E_f$ , Дж, энергий всплывающего в воде пузырька воздуха характеризует энергетический коэффициент  $k_3$ .

С учетом формул (3) и (8) величина энергетического коэффициента пузырька  $k_3$  имеет значение

$$k_3 = \frac{E_w}{E_f} = \frac{\Delta p \cdot W}{\sigma \cdot f} = \frac{2\sigma}{R} \cdot \frac{\delta}{\sigma} = \frac{2\delta}{R} = \frac{2h}{R \cdot k_{\text{ф}}} = \frac{2d}{R \cdot k_{\text{д}}}. \quad (27)$$

Для пузырька сферической формы при  $h = \frac{1}{2} d$ ;  $k_{\text{д}}=6$ ;  $k_{\text{ф}}=4$

$$k_3 = \frac{2d}{\frac{1}{2} \cdot d \cdot 6} = \frac{4}{6} = \frac{k_{\text{фс}}}{k_{\text{дс}}} = \frac{h_c}{d_c}. \quad (28)$$

В турбулентном режиме всплывания пузырьки воздуха при увеличении числа Рейнольдса более критического значения  $Re > Re_{кр} = 500$ , под действием силы гидродинамического давления набегающего потока воды деформируются, в результате чего они изменяют свою форму и приобретают вид, похожий на сплюснутый сфероид с большой осью, нормальной к направлению движения пузырька. Изменяющаяся в процессе всплывания форма пузырька воздуха обуславливает увеличение значения коэффициента гидравлического сопротивления и уменьшение скорости всплывания со значений  $\xi = 0,13$  и  $v = 0,37$  м/с в критической точке 1 до значений  $\xi = 0,4$  и  $v = 0,21$  м/с в критической точке 2. В критической точке 2 турбулентный режим всплывания пузырька воздуха в воде переходит в область развитой турбулентности (область автомодельности закона сопротивления, в которой  $\xi = 0,4 = \text{const}$ ). В отличие от всплывания тонкостенного твердого сферического тела в области развитой турбулентности, где выполняется квадратичный закон Ньютона, в соответствии с которым при постоянном значении  $\xi = 0,4$  величина средней скорости всплывания тела пропорциональна квадратному корню

$$v = f(d^{0,5}) = \sqrt{\frac{W}{\omega} \cdot \frac{2g}{\xi} \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho}} = \sqrt{\frac{4}{6} d \frac{2 \cdot 9,8}{0,4} \cdot \frac{997}{998,2}} = 5,71d^{0,5},$$

изменение формы всплывающего пузырька (изменение соотношения коэффициентов  $k_\phi$  и  $k_d$ ) обуславливает отклонение от закона Ньютона, и величина средней скорости его всплывания подчиняется зависимости  $v = 0,777d^{0,25}$ . При всплывании пузырька воздуха в области развитой турбулентности процесс его сплющивания (уменьшение величины коэффициента формы  $k_\phi$ ) прекращается, коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi$  и коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma^*$  сохраняют свое постоянное значение, пузырек изменяет свою форму сплюснутого сфероида и постепенно приобретает форму выпукло-вогнутой линзы.

В процессе трансформации формы пузырька воздуха от симметричного сфероида до выпукло-вогнутой линзы его нижняя стенка втягивается внутрь, в результате чего объем пузырька  $W$  уменьшается.

В критической точке турбулентного режима всплывания 2 (см. рисунок) пузырек воздуха имеет величину коэффициента поверхностного натяжения

$$\sigma_* = \frac{\sigma_{жг}}{k_\phi} = \frac{0,073}{4} = 0,0183 \text{ Н/м.} \quad (29)$$

В процессе всплывания пузырька в турбулентном режиме величины избыточного давления воздуха внутри пузырька и его характерного размера сохраняют свое постоянное значение ( $\Delta p = 8,9 \text{ Па} = \text{const}$ ;  $h = 0,00091 \text{ м} = \text{const}$ ).

В критической точке турбулентного режима всплывания 2 (см. рисунок) пузырек воздуха имеет величину энергетического коэффициента

$$k_{\phi,*} = \frac{k_{\phi,*}}{k_{d,*}} = \frac{h_*}{d_*} = \frac{1}{k_{dc}} = \frac{1}{6}, \quad (30)$$

где  $k_{dc} = 6$  – коэффициент дисперсности пузырька сферической формы;  $k_{\phi,*}$ ,  $k_{d,*}$ ,  $h_*$ ,  $d_*$  – соответственно коэффициент формы; коэффициент дисперсности; характерный размер и диаметр пузырька воздуха в критической точке 2 турбулентного режима всплывания.

Из (30) следует, что величина диаметра пузырька воздуха в критической точке 2 имеет значение

$$d_* = k_{dc} \cdot h_* = 6 \cdot 0,00091 = 0,00546 \text{ м.} \quad (31)$$

Величина критерия Рейнольдса в критической точке турбулентного режима 2 имеет значение

$$Re = \frac{v_* \cdot d_*}{\nu} = \frac{0,21 \cdot 0,00546}{1,01 \cdot 10^{-6}} = 1135 \approx 1140. \quad (32)$$

Величины радиуса кривизны поверхности  $R_*$ , коэффициента дисперсности  $k_{д*}$  и коэффициента формы  $k_{ф*}$  пузырька воздуха в критической точке 2 в соответствии с формулами (8), (27) и (30) имеют значения:

$$R_* = \frac{2\sigma_*}{\Delta p_*} = \frac{2 \cdot 0,0183}{8,9} = 0,00411 \text{ м}, \quad (33)$$

$$k_{д*} = \frac{2d_*}{R_*} k_{дс} = \frac{2 \cdot 0,00546}{0,00411} \cdot 6 = 16, \quad (34)$$

$$k_{ф*} = \frac{k_{д*}}{k_{дс}} = \frac{16}{6} = 2,66 \text{ м}. \quad (35)$$

Из условия равенства действующих на всплывающий пузырек воздуха сил (7) в критической точке 2 может быть определен его объем:

$$W = \frac{\pi d_*^2}{4} \cdot \xi_* \cdot \frac{v_*^2}{2g} \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{3,14 \cdot 0,00546^2}{4} \cdot 0,4 \cdot \frac{0,21^2}{2 \cdot 9,8} \cdot \frac{997}{998,2} = 2,1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3, \quad (36)$$

$$W = \frac{\pi d_*^2}{4} \cdot \frac{2\sigma}{R} \cdot \frac{1}{\Delta \rho \cdot g} = \frac{3,14 \cdot 0,00546^2}{4} \cdot \frac{2 \cdot 0,0183}{0,00411} \cdot \frac{1}{997 \cdot 9,8} = 2,1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3. \quad (37)$$

Объем симметричного сфероида, состоящего из двух половинок с радиусом кривизны поверхности  $R_*=0,00411$ , высотой  $h_*=0,00091$  м:

$$W = 2\pi h_*^2 \left( R_* - \frac{1}{3} h_* \right) = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,00091^2 \left( 0,00411 - \frac{1}{3} \cdot 0,00091 \right) = 2,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \approx 2,1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3. \quad (38)$$

В данном случае следует отметить, что форма реального пузырька воздуха диаметром  $d_*$  отличается от формы идеального сфероида высотой  $2h_*$  с радиусом кривизны поверхности  $R_*$

Объем пузырька воздуха, всплывающего в области развитой турбулентности, может быть определен по формуле

$$W_{pm} = \omega \cdot \xi \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{3,14 \cdot d^2}{4} \cdot \frac{0,4 \left( 0,777 d^{0,25} \right)^2}{2 \cdot 9,8} \cdot \frac{997}{998,2} = 9,69 \cdot 10^{-3} d^{2,5} \text{ м}^3. \quad (39)$$

Величина сил, действующих на пузырек воздуха, в этом случае в соответствии с формулой (26) имеет значение

$$F_{pm} = W_{pm} \cdot G_{\Delta p} = 9,69 \cdot 10^{-3} d^{2,5} \cdot 9770 = 94,7 d^{2,5} \text{ Н}. \quad (40)$$

Объем пузырька воздуха, всплывающего в турбулентном режиме:

$$W_m = h_m \omega = h_m \frac{\pi d^2}{4} = 0,00091 \cdot \frac{3,14 \cdot d^2}{4} = 7,15 \cdot 10^{-4} d^2 \text{ м}^3. \quad (41)$$

Величина сил, действующих на пузырек воздуха, всплывающий в турбулентном режиме:

$$F_m = W_m \cdot G_{\Delta p} = 7,15 \cdot 10^{-4} d^2 \cdot 9770 = 7,0 d^2 \text{ Н}. \quad (42)$$

Объем сферического пузырька воздуха, всплывающего в ламинарном режиме:

$$W_{л} = \frac{\pi d^3}{6} = \frac{3,14 d^3}{6} = 0,523 d^3 \text{ м}^3. \quad (43)$$

Величина силы поверхностного натяжения, действующей на пузырек воздуха, всплывающий в ламинарном режиме при  $\Delta p_{\sigma} = 8,9 \text{ Па} = \text{const}$ :

$$F_{л\sigma} = \Delta p_{\sigma} \omega = 8,9 \cdot \frac{3,14 d^2}{4} \cdot 7,0 d^2 \text{ Н}. \quad (44)$$



Величина выталкивающей силы и силы гидродинамического давления набегающего потока воды на пузырек воздуха, всплывающий в ламинарном режиме:

$$F_{\text{лв}} = W_{\text{л}} \cdot \sigma_{\Delta p} = 0,523d^3 \cdot 9770 = 5110d^3 \text{ Н.} \quad (45)$$

Диаметр пузырька воздуха в критической точке 2, разделяющей турбулентный режим всплывания и режим всплывания пузырька воздуха в области развитой турбулентности (при  $\xi=0,4=\text{const}$ ), может быть определен из условия  $F_{\text{T}}=F_{\text{PT}}$ , Н:

$$7,0d^2 = 94,7d^{2,5}, \text{ Н,} \quad (46)$$

откуда 
$$d_c = \left( \frac{7,0}{94,7} \right)^2 = 0,00546 \text{ м.} \quad (47)$$

Диаметр пузырька воздуха в критической точке 1, разделяющей ламинарный и турбулентный режимы всплывания пузырька воздуха, может быть определен из условия равенства величины силы поверхностного натяжения значению выталкивающей силы, действующей на пузырек воздуха, всплывающий в ламинарном режиме,  $F_{\text{лс}}=F_{\text{лв}}$ :

$$7,0d^2 = 5111d^3, \text{ Н,} \quad (48)$$

откуда 
$$d_* = \frac{7,0}{5111} = 0,00137 \text{ м.} \quad (49)$$

В процессе сжатия пузырька воздуха его поверхность изменяет форму правильной сферы в критической точке 1 и приобретает форму симметричного сфероидального тела в критической точке 2, при этом величина диаметра пузырька воздуха увеличивается в  $\bar{d} = \frac{d_*}{d_c} = \frac{0,00546}{0,00137} = 4$  раза; радиус кривизны поверхности пузырька – в

$$\bar{R} = \frac{R_*}{R_c} = \frac{0,00411}{0,000685} = 6 \text{ раз; величина коэффициента дисперсности возрастает в}$$

$$\bar{k}_d = \frac{k_{d*}}{k_{dc}} = \frac{16,0}{6,0} = 2,66 \text{ раза; дисперсный размер пузырька – в } \bar{\delta} = \frac{\delta_*}{\delta_c} = \frac{d_*}{k_{d*}} \cdot \frac{k_{dc}}{d_c} = \frac{\bar{d}}{k_d} = \frac{4,0}{2,66} = 1,5$$

раза, удельная площадь поверхности пузырька при этом уменьшается в 1,5 раза

$$\left( \bar{f}_y = \frac{1}{\bar{\delta}} \right); \text{ величина коэффициента формы пузырька уменьшается в}$$

$$\bar{k}_\phi = \frac{k_{\phi c}}{k_{\phi*}} = \frac{4,0}{2,66} = 1,5 \text{ раза, значение энергетического коэффициента пузырька – в}$$

$$\bar{k}_3 = \frac{k_{3c}}{k_{3*}} = \frac{4}{6} : \frac{1}{6} = 4 \text{ раза. Сжатие поверхности пузырька происходит при неизменном}$$

значении величины избыточного давления воздуха в пузырьке  $\Delta p=8,9 \text{ Па} = \text{const}$  и при постоянной величине характерного размера  $h=0,00091 \text{ м} = \text{const}$ . В процессе сжатия поверхности пузырька воздуха, всплывающего в турбулентном режиме, величина

$$\text{коэффициента поверхностного натяжения увеличивается в } \bar{\sigma} = \frac{\sigma_*}{\sigma_c} = \frac{0,0183}{0,003} = 6 \text{ раз и}$$

$$\text{возрастает со значения } \sigma_c = \frac{\sigma_{жг}}{k_{\phi c} \cdot k_{dc}} = \frac{0,073}{4 \cdot 6} = 0,003 \text{ Н/м в критической точке 1 до}$$

$$\text{своего максимального значения } \sigma_* = \frac{\sigma_{жг}}{k_{\phi c}} = \frac{0,073}{4} = 0,0183 \text{ Н/м в критической точке 2.}$$

В качестве характеристики процесса свободного всплывания пузырька газа в жидкости принято использовать постоянную Лапласа, которая представляет собой основной масштаб линейного размера всплывающего пузырька  $l_m$ . Основным масштабом линейного размера пузырька воздуха, свободно всплывающего в неограниченном

объеме воды  $l_m$ , является диаметр пузырька в критической точке 1 ламинарного режима всплывания  $d_c$ .

$$l = d_c = \sqrt{\frac{\sigma_*}{G_{\Delta p}}} = \sqrt{\frac{\sigma_*}{\Delta \rho g}} = \sqrt{\frac{\sigma_{жг}}{k_{\phi} \cdot \rho g}} = \sqrt{\frac{0,073}{4 \cdot 997 \cdot 9,8}} = 0,00137 \text{ м.} \quad (50)$$

Величина избыточного давления воздуха в пузырьках, всплывающих в ламинарном и турбулентном режимах, по аналогии с формулой (50) может быть определена как

$$\Delta p = k_{эс} \sqrt{\sigma_* \cdot G_{\Delta p}} = \frac{k_{фс}}{k_{дс}} \sqrt{\sigma_* \cdot G_{\Delta p}} = \frac{k_{фс}}{k_{дс}} \sqrt{\sigma_* \cdot \rho g} = \frac{4}{6} \sqrt{\frac{0,073}{4} \cdot 997 \cdot 9,8} = 8,9 \text{ Па.} \quad (51)$$

В ы в о д ы :

1. Переход ламинарного режима всплывания пузырька воздуха в чистой воде в турбулентный режим осуществляется при величине критерия Рейнольдса  $Re_{л}=500$  и характеризуется значением константы Лапласа – основного масштаба линейного размера (диаметра пузырька сферической формы в критической точке ламинарного

режима всплывания)  $d_c = \sqrt{\frac{\sigma_*}{G_{\Delta p}}} = \sqrt{\frac{\sigma_{жг}}{k_{\phi} \cdot \rho g}} = \sqrt{\frac{0,073}{4 \cdot 997 \cdot 9,8}} = 0,00137 \text{ м.}$

2. Всплывание пузырька воздуха в турбулентном режиме при величине критерия Рейнольдса  $Re \geq 500$  происходит в условиях динамического равновесия действующих на него сил (выталкивающей силы Архимеда  $F_g$ , силы гидродинамического давления набегающего потока  $F_v$ , силы поверхностного натяжения  $F_{\sigma}$ ).

3. Всплывание пузырька воздуха в ламинарном режиме при величине критерия Рейнольдса  $Re_{л} < 500$  происходит в условиях превышения величины силы поверхностного натяжения  $F_{\sigma}$ , значений выталкивающей силы  $F_g$  и силы гидродинамического давления  $F_v$  ( $F_{\sigma} > F_g = F_v$ ).

4. В турбулентном режиме всплывания пузырька воздуха при величине критерия Рейнольдса  $500 < Re < 1135$  величины избыточного давления воздуха внутри пузырька и его характерного размера сохраняют свое постоянное значение  $\Delta p = 8,9 \text{ Па} = \text{const}$ ;  $h = 0,00091 \text{ м} = \text{const}$ .

5. Переход турбулентного режима всплывания пузырька воздуха в область развитой турбулентности (область автомодельности закона сопротивления при  $\xi = 0,4 = \text{const}$ ) осуществляется при величине критерия Рейнольдса  $Re_{кр} = 1135$  и характеризуется величиной диаметра пузырька воздуха, имеющего форму симметричного сфероидального тела в критической точке турбулентного режима  $d_* = k_{дс} \cdot h_* = 6 \cdot 0,00091 = 0,00546 \text{ м.}$

### Список литературы

1. Андреев, С.Ю. Теоретический анализ термодинамических характеристик пузырьков воздуха, всплывающих в чистой воде в различных режимах / С.Ю. Андреев, Л.В. Белова, К.В. Лебединский // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 2(59). – С. 164–174.
2. Андреев, С.Ю. Теоретические основы процессов всплывания в чистой воде пузырьков воздуха и тонкостенных сферических тел / С.Ю. Андреев, Л.В. Белова, К.В. Лебединский // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – №4. – С.159–168.
3. Andreev, S.Yu. New Methods of Calculating the Patterns of Oxygen Mass Transfer Processes in Dynamic Water-Air Disperse Systems / S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, K.V. Lebedinskii // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2022. – 95(1). – P. 230–239.
4. Andreev, S.Yu. A novel technology for optimizing dissolved air flotation unit efficiency via secondary saturation of the flotation cell with air bubbles and thin-layer

settling / S.Yu. Andreev, K.V. Lebedinskiy, S.V. Stepanov // Chemical Engineering and Processing. – 2023. – Vol. 184. – P. 109292.

5. Андреев, С.Ю. Теоретический анализ свойств водовоздушной смеси, содержащей пузырьки, всплывающие в турбулентном режиме и режиме автомодельности закона сопротивления / С.Ю. Андреев, В.А. Князев // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 2(51). – С. 134–141.

6. Андреев, С.Ю. Математическое моделирование закономерностей всплывания пузырьков в динамических водовоздушных смесях, используемых в процессах флотационной очистки сточных вод / С.Ю. Андреев, М.А. Сафронов, Н.Н. Ласьков, М.И. Яхкинд // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 3(48). – С. 176–185.

## References

1. Andreev, S.Yu. Theoretical analysis of thermodynamic characteristics of air bubbles floating in clean water in various modes / S.Yu. Andreev, L.V. Belova, K.V. Lebedinsky // Regional architecture and engineering. – 2024. – №. 2(59). – P. 164–174.

2. Andreev, S.Yu. Theoretical foundations of the processes of floating air bubbles and thin-walled spherical bodies in clean water / S.Yu. Andreev, L.V. Belova, K.V. Lebedinsky // Regional architecture and engineering. – 2023. – №.4. – P.159–168.

3. Andreev, S.Yu. New Methods of Calculating the Patterns of Oxygen Mass Transfer Processes in Dynamic Water-Air Disperse Systems / S.Yu. Andreev, M.I. Yakhkind, K.V. Lebedinskii // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2022. – 95(1). – P. 230–239.

4. Andreev, S.Yu. A novel technology for optimizing dissolved air flotation unit efficiency via secondary saturation of the flotation cell with air bubbles and thin-layer settling / S.Yu. Andreev, K.V. Lebedinskiy, S.V. Stepanov // Chemical Engineering and Processing. – 2023. – Vol. 184. – P. 109292.

5. Andreev, S.Yu. Theoretical analysis of the properties of a water-air mixture containing bubbles that pop up in a turbulent mode and the self-similarity mode of the law of resistance / S.Yu. Andreev, V.A. Knyazev // Regional architecture and engineering. – 2022. – №. 2(51). – P. 134–141.

6. Andreev, S.Yu. Mathematical modeling of patterns of bubble popping in dynamic water-air mixtures used in flotation wastewater treatment processes / S.Yu. Andreev, M.A. Safronov, N.N. Laskov, M.I. Yakhkind // Regional architecture and engineering. – 2021. – №. 3(48). – P. 176–185.

УДК 628.3

DOI 10.54734/20722958\_2025\_1\_163

*Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры*

Россия, Донецкая Народная Республика,  
286123, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2

**Рожков Виталий Сергеевич,**

доктор технических наук, доцент, директор  
управления научно-исследовательской  
деятельности и инноваций

E-mail: v.s.rozhkov@donnasa.ru

*Акционерное общество «Научно-  
производственное предприятие "Рубин"»*

Россия, 440000, Пенза, Байдукова, 2,  
тел.: +7-8412-20-48-08

**Князев Владимир Александрович,**

кандидат технических наук,  
инженер 1-й категории

E-mail: knyaze1988@mail.ru

*Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства*

Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,

тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Князев Александр Анатольевич,**

старший преподаватель  
кафедры «Инженерная экология»

E-mail: ak-video@mail.ru

*Donbas National Academy of Civil  
Engineering and Architecture*

Russia, Donetsk People's Republic, 286123,  
Makeyevka, 2, Derzhavina St.

**Rozhkov Vitalii Sergeevich,**

Doctor of Sciences, Associate Professor,  
Director of the Research and Innovation  
Department

E-mail: v.s.rozhkov@donnasa.ru

*Joint Stock Company Research And  
Production Enterprise Rubin*

Russia, 440000, Penza, 2, Baidukova,  
tel: + 7-8412-20-48-08

**Knyazev Vladimir Aleksandrovich,**

Candidate of Sciences,  
1st Category Engineer

E-mail: knyaze1988@mail.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Knyazev Aleksander Anatolyevich,**

Senior Lecturer of the Department  
«Environmental Engineering»

E-mail: ak-video@mail.ru

## НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА НЕЙТРАЛИЗАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ГАЛЬВАНОПРОИЗВОДСТВ, ПРЕДУСМАТРИВАЮЩАЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕАГЕНТА-ОКИСЛИТЕЛЯ ФЕРРАТА НАТРИЯ

В.С. Рожков, В.А. Князев, А.А. Князев

Приведены результаты теоретических исследований возможности использования высокоактивного реагента-окислителя феррата натрия для интенсификации процесса нейтрализационной очистки сточных вод гальванопроизводств. Показано, что щелочной раствор феррата натрия может быть получен непосредственно на площадке локальных канализационных очистных сооружений в процессе электроактивационной обработки водного раствора гидроксида натрия в мембранном электролизёре с железными пластинчатыми анодами. Внедрение нового технологического приема, дополнительной электроактивационной обработки части водного раствора гидроксида натрия, используемого в традиционном процессе нейтрализационной очистки сточных вод гальванопроизводств, обеспечит повышение Eh потенциала обрабатываемых сточных вод и позволит существенно увеличить барьерную функцию очистных сооружений.

*Ключевые слова: нейтрализационная очистка, реагент-окислитель, щелочной раствор, электроактивационная обработка, мембранный электролизер, окислительный потенциал*

## NEW TECHNOLOGY FOR INTENSIFICATION THE PROCESS OF NEUTRALIZATION TREATMENT OF WASTEWATER OF GALVANIC PRODUCTIONS INVOLVING THE USE OF SODIUM FERRATE OXIDIZING REAGENT

V.S. Rozhkov, V.A. Knyazev, A.A. Knyazev

The results of theoretical studies of the possibility of using a highly active reagent-oxidizer sodium ferrate for intensifying the process of neutralization treatment of wastewater from galvanic production are presented. It is shown that an alkaline solution of sodium ferrate can be obtained directly on the site of local sewage treatment facilities in the process of electroactivation treatment of an aqueous solution of sodium hydroxide in a membrane electrolyzer with iron plate anodes. The introduction of a new technological method, additional electroactivation treatment of part of the aqueous solution of sodium hydroxide used in the traditional process of neutralization treatment of wastewater from galvanic production, will ensure an increase in the Eh potential of the treated wastewater and will significantly improve the barrier function of treatment facilities.

*Keywords: neutralization purification, reagent oxidizer, alkaline solution, electrical activation treatment, membrane electrolyzer, oxidation potential*

Сточные воды, образующиеся в результате проведения технологических процессов нанесения гальванических покрытий, содержат в своем составе токсичные ингредиенты – ионы тяжелых металлов. Сточные воды, содержащие ионы тяжелых металлов, попадая в открытые водоемы, оказывают крайне негативное воздействие на флору и фауну водоема. Присутствующие в воде водоема ионы тяжелых металлов концентрируются в донных отложениях и поверхностной пленке, накапливаются в биоте.

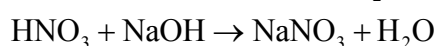
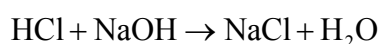
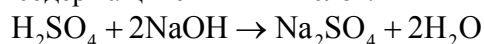
Концентрация ионов тяжелых металлов, содержащихся в некоторых видах планктона, превышает их концентрацию в воде водоема в тысячи раз и более. Ионы тяжелых металлов обладают высокой реакционной способностью и могут образовывать высокотоксичные комплексные соединения с загрязняющими веществами, содержащимися в воде водоема. Актуальность проблемы снижения степени загрязненности природных вод ионами тяжелых металлов обуславливается не только природоохранными и рыбохозяйственными целями, но и необходимостью существенного повышения барьерной функции водоочистных сооружений, потребляющих воду из водисточников промышленного и хозяйственно-питьевого водоснабжения, загрязненных токсичными соединениями.

Для обезвреживания сточных вод гальванопроизводств в настоящее время как в нашей стране, так и за рубежом, широкое распространение получил метод нейтрализации [1, 2, 3]. Процесс нейтрализационной обработки сточных вод предусматривает дозирование в них щелочных реагентов – гидроксида натрия NaOH, гашеной извести Ca(OH)<sub>2</sub>, кальцинированной соды Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, что приводит к повышению уровня pH и к увеличению концентрации гидроксильных ионов. Повышение уровня pH сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов, обуславливает сдвиг процесса фазово-дисперсных превращений примесей воды (ионизация-моляризация) от ионной формы в сторону молекулярной составляющей.

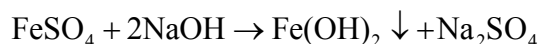
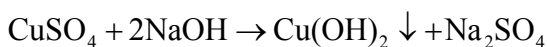
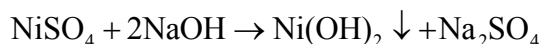
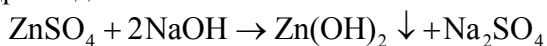
Избыток гидроксильных ионов при повышении уровня pH сточных вод приводит к увеличению степени гидролиза тяжелых металлов, образованию хлопьев гидроксидов металлов, выпадающих в осадок в процессе отстаивания.

На локальных очистных сооружениях промышленных предприятий для проведения нейтрализационной обработки сточных вод гальванопроизводств, как правило, используются высококонцентрированные водные растворы гидроксида натрия.

На первой стадии щелочной обработки сточных вод гальванопроизводств осуществляется нейтрализация содержащихся в них кислот:



На второй стадии обезвреживания сточных вод гальванопроизводств образуются малорастворимые гидроксиды тяжелых металлов:



Процессы нейтрализации ионов тяжелых металлов идут лучше в разбавленных растворах, в этом случае более полное протекание реакции нейтрализации в них достигается при меньшем избытке подщелачивающего раствора.

Метод нейтрализационной обработки сточных вод гальванопроизводств, обеспечивающий осаждение хлопьев гидроксидов тяжелых металлов в процессе отстаивания, получил широкое распространение на локальных канализационных очистных сооружениях промышленных предприятий благодаря основным своим преимуществам:

- 1) низкая стоимость щелочных реагентов;
- 2) возможность гибкого управления процессами нейтрализационной очистки и их автоматизации;
- 3) невысокая цена аппаратного оформления технологического процесса нейтрализационной очистки.

В процессе нейтрализационной очистки сточных вод гальванопроизводств, наряду с гидроксидами, образуются соли тяжелых металлов, растворимость которых больше растворимости гидроксидов этих металлов, в связи с этим каждый вид иона металла имеет оптимальную область pH, в которой наблюдается максимально полное осаждение его гидроксидов. Данное обстоятельство существенно усложняет процесс очистки сточных вод гальванопроизводств, содержащих в своем составе несколько разновидностей ионов тяжелых металлов. Поддержание уровня pH на оптимальном значении для одного металла, как правило, приводит к повышению растворимости гидроксидов другого металла, что отрицательно сказывается на общей эффективности процесса нейтрализационной очистки сточных вод.

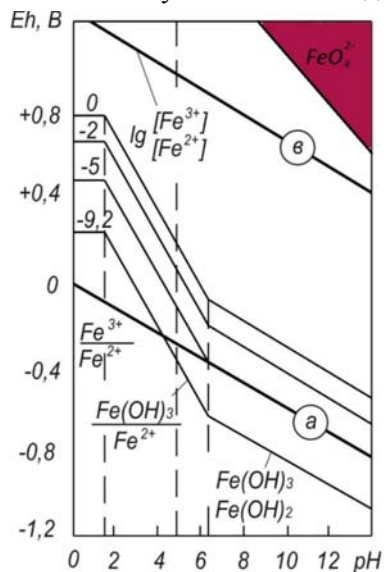
Уровень предельно допустимых концентраций (ПДК) ионов тяжелых металлов в сточных водах, сбрасываемых в открытые водоемы, достигает значений порядка сотых долей миллиграмма на литр.

Концентрации ионов тяжелых металлов в сточных водах, прошедших процесс нейтрализационной очистки, как правило, превышают величины установленных для них ПДК, что обуславливает необходимость повышения эффективности работы локальных очистных сооружений промышленных предприятий.

Поскольку фазово-дисперсное состояние, в котором находятся вещества, загрязняющие сточные воды, определяется не только значением уровня pH, но и величиной Eh-потенциала среды, процесс очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов может быть существенно интенсифицирован за счет использования реагентов-окислителей (корректоров уровня Eh-среды).

Определить возможность перехода загрязняющего ингредиента сточных вод из одного фазово-дисперсного состояния в другое в зависимости от уровня Eh и pH позволяют термодинамические диаграммы состояния «элемент – вода» (диаграммы Пурбе).

Термодинамическая диаграмма состояния «элемент – вода» для железа представлена на рисунке. Область электрохимической устойчивости воды на термодинамической диаграмме состояния «элемент – вода» лежит между наклонными линиями *a* и *в*.



Термодинамическая диаграмма состояния «элемент – вода»

Ниже линии равновесных потенциалов водородного электрода *a* лежит область термодинамической неустойчивости воды, в которой сточные воды разлагаются с выделением водорода.

Выше линии равновесных потенциалов кислородного электрода *b* лежит область термодинамической неустойчивости воды, в которой вода разлагается с выделением кислорода.

В водной среде могут одновременно существовать как ионы двухвалентного железа  $Fe^{2+}$ , так и ионы трехвалентного железа  $Fe^{3+}$ , в результате чего в растворе образуется окислительно-восстановительная система и устанавливается соотношение

$$\text{ионов } \frac{Fe^{3+}}{Fe^{2+}}.$$

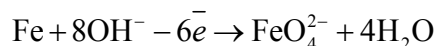
В соответствии с данными, представленными на диаграмме, при уровне pH среды менее 1,5, ионы  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$  не вступают в реакцию гидролиза и не образуют нерастворимого осадка. Образование осадка  $Fe(OH)_3$  начинается при  $pH \geq 1,5$ , а образование осадка  $Fe(OH)_2$  – при  $pH \geq 6,3$ .

Как видно из представленной диаграммы, в области термодинамической неустойчивости воды при  $pH \geq 10$  и  $Eh > +0,8В$  могут существовать феррат-ионы  $FeO_4^{2-}$ .

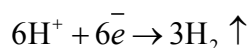
Высокоактивный реагент-окислитель феррат натрия может быть получен непосредственно на локальных канализационных очистных сооружениях в результате электроактивационной обработки водного раствора гидроксида натрия, используемого в технологическом процессе нейтрализационной очистки гальваностокков. При электроактивационной обработке водного раствора гидроксида натрия в мембранном электролизере с железными пластинчатыми электродами в щелочной среде с высоким уровнем pH происходит электрохимическое окисление материала железного анода, сопровождающееся выделением в раствор феррат-ионов  $FeO_4^{2-}$ , в результате чего прошедший электроактивационную обработку раствор гидроксида натрия приобретает ярко выраженные свойства высокоактивного реагента-окислителя.

В процессе электроактивационной обработки водного раствора гидроксида натрия протекают следующие реакции:

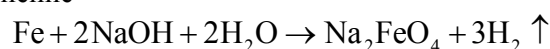
– анодный процесс



– катодный процесс

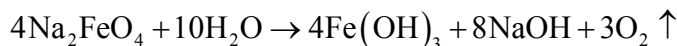


– суммарное уравнение



Высокая химическая активность феррат-иона обуславливает его нестабильность.

Феррат натрия со временем разлагается в соответствии с уравнением химической реакции

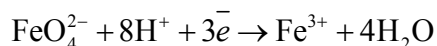


Проведенные лабораторные исследования процесса распада щелочных растворов феррата натрия, описанные в [4], показывают, что период полураспада феррата натрия в 30 % растворе щелочи при температуре 20°C составляет 36 часов, в 40 % растворе щелочи при температуре 20°C – 60 часов.

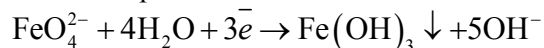
Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что водные растворы гидроксида натрия, прошедшие электроактивационную обработку в мембранном электролизере с пластинчатыми железными анодами, должны быть использованы в технологическом процессе нейтрализационной очистки сточных вод гальванопроизводства в течение суток.

При дозировании щелочного раствора феррата натрия в сточные воды, имеющие пониженный уровень pH ( $pH < 7$ ), окислительный потенциал феррат-ионов достигает

значения  $E^{\circ}=+2,2$  В, и они быстро разлагаются в соответствии с уравнением химической реакции



Существенно интенсифицировать процесс нейтрализационной очистки сточных вод гальванопроизводств можно, дополнительно дозируя в них водный раствор гидроксида натрия, прошедший электроактивационную обработку. Попадая в сточные воды, имеющие повышенный уровень рН ( $\text{pH}>7$ ), феррат-ионы разлагаются в соответствии с уравнением химической реакции



При разложении феррат-ионов образуется нетоксичное соединение гидроксида железа III, которое обладает ярко выраженными коагулирующими свойствами, что позволяет повысить гидравлическую крупность хлопьев гидроксидов тяжелых металлов, выделяющихся в процессе нейтрализационной очистки сточных вод гальванопроизводств, и интенсифицировать работу отстойников.

Проведенные теоретические исследования возможности использования реагента-окислителя феррата натрия для интенсификации процесса очистки сточных вод гальванопроизводств позволили сделать следующие выводы.

В ы в о д ы :

1. Щелочной раствор феррата натрия может быть получен непосредственно на площадке локальных канализационных очистных сооружений в процессе электроактивационной обработки части объема водного раствора гидроксида натрия, используемого при традиционном процессе нейтрализационной очистки сточных вод гальванопроизводств.

2. При электроактивационной обработке водного раствора гидроксида натрия в мембранном электролизере с железными пластинчатыми анодами происходит электрохимическое окисление материала анодов с выделением в обрабатываемый раствор феррат-ионов, в результате чего он приобретает ярко выраженные свойства высокоактивного реагента-окислителя.

3. В сорокапроцентном водном растворе гидроксида натрия, прошедшем электроактивационную обработку, период полураспада феррат-ионов в процессе хранения щелочного раствора феррата натрия при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  составляет 60 часов, в связи с чем щелочной раствор феррата натрия должен быть использован в технологическом процессе нетрадиционной очистки сточных вод гальванопроизводств в течение суток.

4. Высокая окислительная активность щелочного раствора феррата натрия позволит увеличить значение Eh-потенциала сточных вод в процессе их нетрадиционной очистки и за счет этого повысить эффективность работы локальных канализационных очистных сооружений.

### Список литературы

1. Андреев, С.Ю. Исследование технологии электрохимической активации щелочных реагентов для интенсификации работы локальных очистных сооружений / С.Ю. Андреев, М.П. Яхкин, И.А. Гарькина, В.А. Князев // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – №2. – С. 120–124.
2. Гогина, Е.С. Ресурсосберегающие технологии промышленного водоснабжения и водоотведения / Е.С. Гогина, Л.Д. Гуринович, Е.А. Урецкий. – Москва: Ассоциация строительных вузов, 2015. – 312 с.
3. Алексеев, Е.В. Физико-химическая очистка сточных вод / Е.В. Алексеев. – Москва: Ассоциация строительных вузов, 2007. – 248 с.
4. Андреев, С.Ю. Исследование кинематики процесса разложения ферратов в растворах гидроксида натрия, прошедших электроактивационную обработку / С.Ю. Андреев, Н.Н. Ласьков, А.А. Князев, М.С. Долгушев // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – №2 – С. 150–156.



1. Andreev, S.Yu. Study of the electrochemical activation technology of alkaline reagents for intensification of local sewage treatment plants / S.Yu. Andreev, M.P. Yakkhin, I.A. Garkin, V.A. Knyazev // Regional architecture and engineering. – 2015. – №2. – P.120–124.
2. Gogina, E.S. Resource-saving technologies of industrial water supply and water treatment / E.S. Gogina, L.D. Gurinovich, E.A. Uretski. – Moscow: Association of construction universities, 2015. – 312 p.
3. Alekseev, E.V. Physical-chemical treatment of waste water / E.V. Alekseev. – Moscow: Association of construction universities, 2007. – 248 p.
4. Andreev, S.Yu. Investigation of the kinematics of the process of degradation of ferrate in solutions of sodium hydroxide, which have undergone electroactivation / S.Yu. Andreev, N.N. Lashkov, A.A. Knyazev, M.S. Dolgushev // Regional architecture and engineering. – 2020. – №2. – P.150–156.

УДК 621.642

DOI 10.54734/20722958\_2025\_1\_169

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.*

Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая 77, тел. (8452) 99-88-93

**Осипова Наталия Николаевна**,  
доктор технических наук, доцент,  
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение  
и нефтегазовое дело»  
E-mail: osnat75@mail.ru

**Яковлев Дмитрий Сергеевич**,  
аспирант кафедры «Теплогазоснабжение  
и нефтегазовое дело»  
E-mail: dimon96@bk.ru

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Гришин Борис Михайлович**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Водоснабжение,  
водоотведение и гидротехника»  
E-mail: bgrishin@rambler.ru

*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov*

Russia, 410054, Saratov, 77,  
Politechnicheskaya St., tel. (8452) 99-88-93

**Osipova Nataliya Nikolaevna**,  
Doctor of Sciences, Associate Professor,  
Head of the Department «Heat and Gas  
Supply and Oil and Gas Business»  
E-mail: osnat75@mail.ru

**Yakovlev Dmitry Sergeevich**,  
Post-graduate student of the Department  
«Heat and Gas Supply and Oil and Gas  
Business»  
E-mail: dimon96@bk.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Grishin Boris Mikhailovich**,  
Doctor of Sciences, Professor, Head of the  
Department «Water Supply, Sewerage and  
Hydraulic Engineering»  
E-mail: bgrishin@rambler.ru

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ БАЛЛОННЫХ УСТАНОВОК ПРИ ИХ ЗАПОЛНЕНИИ СЖИЖЕННЫМ УГЛЕВОДОРОДНЫМ ГАЗОМ

Н.Н. Осипова, Д.С. Яковлев, Б.М. Гришин

Обоснована необходимость контролируемого заполнения баллонов потребителей сжиженным углеводородным газом в холодный период времени года для исключения излишне заливаемого газа в баллон. Предложена методика определения эффективности применения контролируемого отпуска газа в баллонные установки. Разработана программа расчета массы газа для заполнения, учитывающая объем сосуда, температуру, компонентный состав газа, способ последующей эксплуатации или хранения. Произведен расчет экономической и ресурсной эффективности предлагаемого контролируемого отпуска газа для баллонных установок, эксплуатируемых в трёх климатических зонах.

*Ключевые слова: композитные баллоны, заполнение сжиженным углеводородным газом, методика и программа расчета, экономия материальных средств*

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF BALLOON INSTALLATIONS WHEN THEY ARE FILLED WITH LIQUEFIED PETROLIUM GAS

N.N. Osipova, D.S. Yakovlev, B.M. Grishin

The need for controlled filling of consumer balloons with liquefied petroleum gas during the cold season to avoid overfilling of gas is substantiated. A method for determining the effectiveness of using controlled gas supply to balloons units has been proposed. A program has been developed for calculating the mass of gas for filling, taking into account the volume of the vessel, temperature, component composition of the gas, and method of subsequent operation or storage. A calculation of

the economic and resource efficiency of the proposed controlled gas supply for balloons installation operating in three climatic zones is carried out.

*Keywords: composite cylinders, filling with liquefied petroleum gas, calculation method and program, saving material resources*

**Введение.** Газоснабжение территорий, не имеющих разветвленной сети природного газа, осуществляется в том числе с использованием баллонных систем снабжения сжиженным углеводородным газом (СУГ). В практике эксплуатации баллонов у населения на территории Российской Федерации основную долю до последних лет занимали металлические баллоны, производимые согласно ГОСТ 15860. В настоящее время в РФ и мире активно внедряются в практику эксплуатации баллоны из композитных материалов, отвечающие всем требованиям по безопасности использования газового топлива в быту, имеющие размерный ряд сосудов вместимостью от 3 до 47 литров и обладающие улучшенными качествами [1–4].

В то же время широкое разнообразие производителей композитных баллонов, выпускающих сосуды с различной первоначальной массой, отличной от других вместимостью и маркировкой по маркам заливаемых газов, не применяемых на территории РФ, приводит к необходимости индивидуального подхода к заполнению сосудов газом. Установлено, что отработанная и применяемая методика заполнения по стандартной массе газа для существующего размерного ряда металлических сосудов, включающего четыре типоразмера баллонов, не эффективна для композитных баллонов при использовании карусельных установок на газонаполнительных станциях в силу огромного разнообразия факторов формы композитных сосудов различных производителей [3, 4].

Индивидуальная децентрализованная заправка одиночных баллонов требует перенастройки оборудования газонаполнительных станций, что приводит к уменьшению общего количества заправляемых баллонов за счет потери времени, и поэтому в основном осуществляется на газонаполнительных пунктах (ГНП), обладающих меньшей производительностью и расположенных территориально ближе к потребителю. Вследствие отсутствия четкого понимания, какое количество газа необходимо заправить в сосуд, результатом заполнения оказывается «недолив» газа в теплый период и «перелив» в холодный период года [5–7].

Как показали исследования Рачевского Б.С., Шеногина М.В., Недлина М.С., Атамова А.А., заполнение газа в сосуд в практике эксплуатации зачастую не соответствует требованиям ГОСТ 54982, и при децентрализованной заправке в большинстве случаев присутствует отступление от нормы в большую сторону вплоть до полного заполнения баллона [8–11]. Особенно проблема излишнего заполнения баллонов газом становится очевидной в холодный период года, когда основной или резервный баллон у потребителя может эксплуатироваться и храниться при положительных температурах. При нагреве баллона происходит температурное расширение газа, в результате возникают разрыв оболочки, разгерметизация сосуда и разлив СУГ, обуславливающие воспламенение или взрыв газа и приводящие к большим разрушениям и человеческим жертвам, что подтверждается многочисленными сообщениями средств массовой информации и публикациями служб Министерства чрезвычайных ситуаций Российской Федерации.

Целью проводимых исследований является создание и внедрение инструмента контроля отпуска газа потребителям при заправке композитных баллонов, а также обоснование положительного эффекта внедрения контролируемого отпуска газа в практику эксплуатации для повышения эффективности баллонных систем газоснабжения.

Методами для реализации поставленной цели исследований являются математическое моделирование, объектно-ориентированное программирование, статистическая обработка и сравнительный анализ данных, а также обобщение полученных результатов с помощью ЭВМ.

**Методика определения эффективности применения контролируемого отпуска газа в баллонные установки.** Максимальное заполнение баллона газом определяется объемным расширением смеси газа при максимальной температуре нагрева баллона:

$$V'_6 = \frac{V_6(a\nu_{\text{пр}} + b\nu_6)}{\nu_{\text{ж}}}, \quad (1)$$

где  $V_6$  – объем сосуда,  $\text{м}^3$ ;  $\nu_{\text{ж}}$  – удельный объем жидкой фазы многокомпонентного газа при максимально допустимой температуре нагрева,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;  $\nu_{\text{пр}}, \nu_6$  – удельный объем жидкой фазы пропана, бутана при текущей температуре,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;  $a, b$  – содержание в жидкой фазе газа пропана, бутана соответственно, % (вес.).

Фактическое количество газа, отпускаемое в сутки с газонаполнительного пункта при отсутствии контроля заполнения:

$$M_{\Gamma} = \frac{V'_6 \rho_{\text{см}} \tau_{\text{р}} k_{\text{изб}}}{\tau_6}, \quad (2)$$

где  $\tau_{\text{р}}$  – время работы пункта заполнения баллонов, ч;  $\tau_6$  – время заполнения баллона с учетом времени подготовки к заполнению (внешний осмотр, слив неиспарившихся остатков из сосуда), ч;  $\rho_{\text{см}}$  – плотность жидкой фазы СУГ при соответствующей температуре жидкого газа,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $k_{\text{изб}}$  – коэффициент избытка заполнения баллона газом.

В свою очередь, коэффициент избытка жидкой фазы заливаемого газа в баллон определяется по формуле

$$k_{\text{изб}} = \frac{M_{\Gamma}}{M_{\Gamma}^{\text{max}}}, \quad (3)$$

где  $M_{\Gamma}^{\text{max}}$  – предельно допустимая масса жидкой фазы в баллоне, кг;  $M_{\Gamma}$  – фактическая масса газа, заливаемая в баллон, кг; принимается при отсутствии контроля заполнения 85 % и 100 % от вместимости баллона.

Количество газа, рекомендуемое к отпуску в сутки с учетом компонентной и температурной коррекции, находим по формуле

$$M_{\Gamma}^{\text{к}} = \frac{V'_6 \rho_{\text{см}} \tau_{\text{р}}}{\tau_6}. \quad (4)$$

Сокращение отпуска газа потребителю за холодный период эксплуатации газонаполнительного пункта заполнения баллонов при осуществлении контроля определяется по выражению

$$\Delta M_{\text{гнп}} = (1 - \eta) \left( \sum_{i=1}^n M_{\Gamma} - A M_{\Gamma}^{\text{к}} \right), \quad (5)$$

где  $\sum_{i=1}^n M_{\Gamma}$  – сумма отпуска газа за холодный период при заправке баллонов при отсутствии контроля, кг; принимается согласно метеорологическим данным климатического района за холодный период отдельно для каждого суток эксплуатации ГНП;  $A$  – количество суток холодного периода, принимается в соответствии с указанной продолжительностью в зависимости от климатического района по ГОСТ 52087, сут;  $\eta$  – доля композитных баллонов в общей заправке баллонов газом.

С учетом того, что индивидуальная баллонная установка минимально комплектуется по требованиям СП 62.13330 двумя баллонами, один из которых рабочий, а

другой запасной, для обеспечения непрерывности газоснабжения потребителей, прирост обслуживания индивидуальных баллонных установок составит, шт.:

$$n = \frac{0,5\Delta M_{\text{гнп}}}{M_{\text{г}}^{\text{max}}}. \quad (6)$$

Наличие контроля обеспечивает уменьшение массы газа, заливаемой в баллоны потребителей за холодный период, в расчете на одну индивидуальную баллонную установку, кг, на величину:

$$\Delta q_{\text{г}}^{\text{хп}} = \frac{2AM_{\text{г}}^{\text{max}}(k_{\text{изб}} - 1)}{Z}, \quad (7)$$

где  $Z$  – количество дней непрерывной эксплуатации баллонной установки у потребителя в зависимости от расхода газового топлива на обеспечение коммунально-бытовых нужд, сут. Принимается по результатам исследований авторов [12].

Экономия материальных средств потребителя при контролируемом отпуске газа в баллоны за холодный период эксплуатации в расчете на одну индивидуальную баллонную установку составит, руб.:

$$C_{\text{сут}}^{\text{п}} = k_{\text{сут}} \Delta q_{\text{г}}^{\text{хп}}, \quad (8)$$

где  $k_{\text{сут}}$  – стоимость сжиженного углеводородного газа при отпуске потребителю в зависимости от региона реализации, руб./кг.

**Результаты и обсуждение.** С учетом выражений (1) – (8) были произведены расчеты по обоснованию целесообразности контроля массы газа, заливаемой в сосуд, в различных климатических зонах эксплуатации баллонных установок, рассчитано дополнительное количество баллонных установок, принимаемых к обслуживанию, определена экономия материальных средств потребителей при контролируемом отпуске газа в сосуды. Для расчетов были приняты исходные данные:

- для заправки используются металлические баллоны 50 л и композитные баллоны вместимостью 47 л;
- коэффициент избытка жидкой фазы  $k_{\text{изб}}$  в диапазоне температур от минус 30 °С до плюс 10 °С принимается от 1,23 до 1,01;
- доля композитных баллонов в общем количестве заправляемых баллонов – 0,3; 0,5; 1,0;
- продолжительности холодного периода приняты согласно ГОСТ 52087 для умеренно-холодной зоны (г. Саратов); холодной зоны (г. Иркутск); очень холодной зоны (г. Магадан);
- заправка баллонов осуществляется маркой газа для холодного периода – пропан технический;
- время работы пункта по наполнению баллонов составляет 10 часов в сутки;
- количество дней непрерывной эксплуатации баллонных установок у потребителя принимается в зависимости от установленного у населения газоиспользующего оборудования по результатам исследований [12];
- стоимость 1 кг газа для отпуска населению в соответствии с климатическими зонами эксплуатации.

Для возможности реализации предложенного подхода к определению эффективности эксплуатации баллонных систем газоснабжения, авторами была разработана программа для ЭВМ на языке C#, позволяющая, в зависимости от компонентного состава заливаемой смеси, температуры СУГ и вместимости баллона, рассчитать массу газа, заливаемую в композитный баллон (№ 2024661623 от 21.05.2024 года в реестре программ для ЭВМ в Федеральном институте промышленной собственности РФ). Интерфейс программы представлен на рис. 1.

Рис. 1. Общий вид окна для ввода данных и вывода результатов расчета

С учетом разработанной методики исследований и программы для ЭВМ были рассчитаны отгрузка газа в баллоны для населения и сокращение отпуска газа с ГНП в течение холодного периода эксплуатации. Результаты расчетов представлены на рис. 2 и 3.

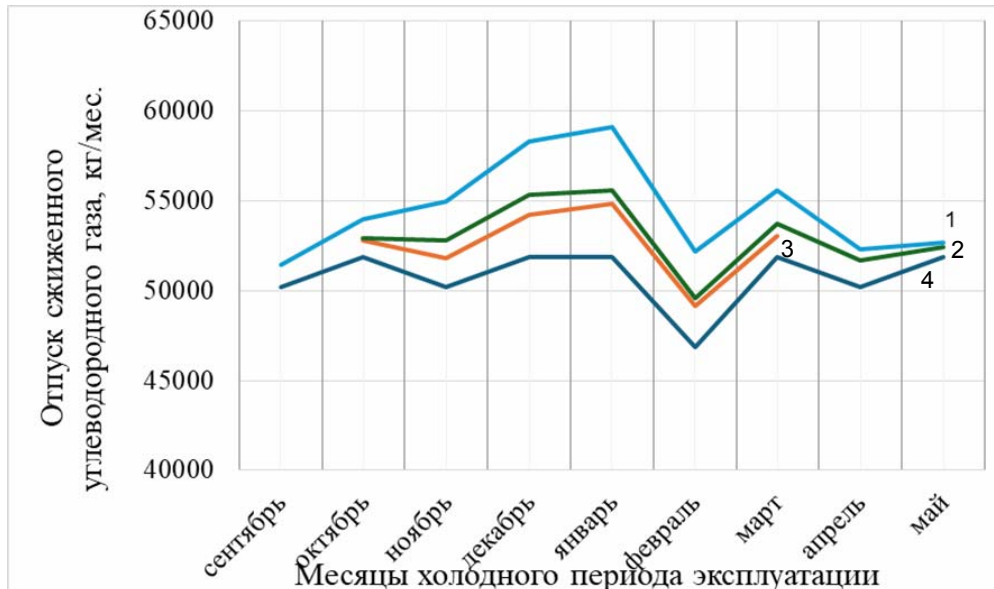


Рис. 2. Отпуск газа с газонаполнительного пункта в холодный период по месяцам:  
 1 – очень холодная зона; 2 – холодная; 3 – умеренно-холодная;  
 4 – контролируемый отпуск независимо от климатической зоны

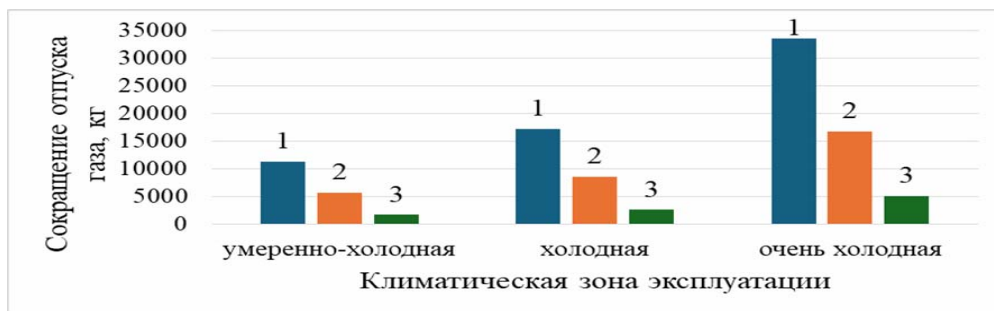


Рис. 3. Диаграммы сокращения отпуска газа с ГНП по климатическим зонам эксплуатации за холодный период эксплуатации при доле композитных баллонов в общем количестве заправляемых баллонов:  
 1 – 1,0; 2 – 0,5; 3 – 0,3

Как видно из рис. 2, отпуск газа во всех климатических зонах при отсутствии контроля заполнения обуславливает излишне заливаемый газ в баллон (графики 1–3). Количество заливаемого газа сверх нормы определяется температурой окружающей среды и принимает максимальные значения при температуре от минус 20 °С и ниже, соответствующей декабрю и январю, как наиболее холодным месяцам зимнего периода во всех климатических зонах. Наличие контроля отпуска газа (график 4) снижает отпуск газа в баллоны для потребителей по месяцам и не зависит от климатической зоны эксплуатации. Характерные значения отгрузки газа по массе зависят только от погодных условий рассматриваемого холодного месяца, выбранного для исследований года эксплуатации (в настоящей статье 2022–2023 гг.), являются изменчивыми и могут различаться при других сочетаниях суточных температур рассматриваемых периодов.

Анализ диаграмм на рис. 3 показывает, что наиболее значительное сокращение отпуска газа имеет место в очень холодной зоне эксплуатации при любой доле присутствия композитных баллонов в общем объеме заправки. Данное обстоятельство объясняется наличием низких суточных температур, которые обуславливают максимальный коэффициент избытка жидкой фазы  $k_{изб}$  при заполнении баллонов. Меньшее сокращение отпуска наблюдается в умеренно-холодной климатической зоне эксплуатации, характеризуемой более высокой суточной температурой в течение холодного периода.

Экономия материальных средств потребителей при контролируемом отпуске газа в баллоны за холодный период эксплуатации и увеличение количества обслуживаемых баллонных установок потребителя представлены в таблице.

Показатели эффективности внедрения контролируемого отпуска газа в композитные баллоны потребителей

Климатическая зона эксплуатации	Экономия материальных средств контролируемого отпуска СУГ, руб, при наличии у потребителей газовой плиты и				Прирост количества обслуживаемых баллонных установок, шт., при доле композитных баллонов у потребителей		
	централизованного горячего водоснабжения		газового водонагревателя				
	$k_{изб}^{100\%}$	$k_{изб}^{85\%}$	$k_{изб}^{100\%}$	$k_{изб}^{85\%}$	0,3	0,5	1,0
Умеренно-холодная	1772-2548*	110-886	6854-9853	428-3427	162	269	539
Холодная	2791-3941	171-1370	10601-15239	662-5300	247	412	824
Очень холодная	5136-7383	321-2568	19859-28548	1241-9930	482	803	1606

\* Минимально и максимально возможная экономия материальных средств в зависимости от температуры отпуска газа (принимается в диапазоне температур от плюс 10 °С до минус 30 °С, соответствующих значениям температур в интервале рассматриваемых месяцев холодного периода согласно ГОСТ 52087).

Как видно из таблицы, внедрение системы контроля заполнения сосудов сжиженным углеводородным газом обеспечивает значительную экономию материальных средств потребителей, составляющую в зависимости от климатической зоны эксплуатации и газоиспользующего оборудования у потребителя от 110 до 28548 руб. за холодный период. Прирост количества обслуживаемых баллонных установок составит от 162 шт. при доле композитных баллонов у потребителей 30 % до 1606 шт. при полном переходе потребителей на использование композитных баллонов для коммунально-бытового обеспечения.

**Выводы:**

1. Обоснована целесообразность контролируемого заполнения сжиженного углеводородного газа в сосуды в целях повышения эффективности эксплуатации баллонных установок у потребителей. В качестве инструмента контроля отпуска газа потребителям разработаны методика и программа для расчета количества газа, заливаемого в баллон в зависимости от вместимости сосуда, компонентного состава газа, температуры окружающей среды, условий эксплуатации или хранения баллона (№ рег. 2024661623 от 21.05.2024 года).
2. Определена экономия материальных средств потребителей за холодный период в зависимости от климатической зоны эксплуатации и особенностей использования газа на коммунально-бытовые нужды при наличии контролируемого заполнения баллонов газом.
3. Внедрение системы контроля заполнения баллонов газом обеспечит прирост обслуживаемых индивидуальных баллонных установок в количестве от 162 до 1606 шт., в зависимости от климатической зоны эксплуатации и доли композитных баллонов от общего числа заправляемых сосудов.

## Список литературы

1. Composite Cylinder Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report by Cylinder: Global Opportunity // Analysis and Industry Forecast. 2021-2030. – CP: Storage And Distribution, 2022. – 353 p.
2. Тульцов, В.А. Применение композитных газовых баллонов при газоснабжении потребителей / В.А. Тульцов // Совершенствование методов гидравлических расчетов водопропускных и очистных сооружений. – 2019. – Т. 1, № 1 (44). – С. 115–118.
3. Liquefied Petroleum Gas Cylinder Market by Type, End-user and Geography // Oil & Gas Storage & Transportation. Forecast and Analysis 2023-2027. – 2023. – 162 p.
4. LPG Composite Cylinders Market Outlook Report – Industry Size, Trends, Insights, Market Share, Competition, Opportunities, and Growth Forecasts by Segments, 2022 to 2030. – Region: Global, 2023. – 146 p.
5. Composite cylinders use and handling in the propane industry // Propane Education & Research. – 2022. – 16 p.
6. Tripathi, A. Design and Analysis of a Composite Cylinder for the Storage of Liquefied Gases / A. Tripathi, A. Kumar, M. K. Chandrakar // International Journal for Scientific Research & Development. – 2017. – Vol. 5 (03). – P. 871–876.
7. Abdirashidov, A.A. Analysis of composite polymer materials used in high pressure gas cylinders / A.A. Abdirashidov, N.K. Nurqobilov // European Scholar Journal (ESJ). – 2021. – Vol. 2 (1). – P. 27–28. – URL: <https://www.scholarzest.com>
8. Рачевский, Б.С. Прогноз и устранение взрывов баллонов со сжиженным углеводородным газом / Б.С. Рачевский // Безопасность труда в промышленности. 2018. – № 7. – С. 43–46.
9. Шеногин, М.В. Мероприятия по снижению аварийности бытовых газовых баллонов со сжиженными углеводородными газами / М.В. Шеногин // Инновации и инвестиции. – 2018. – № 12. – С. 204–209.
10. Недлин, М.С. О безопасности баллонных установок СУГ / М.С. Недлин // Факел. – 2014. – № 2. – С. 16–18.
11. Атамов, А.А. Подача жидкого газа и меры бытовой безопасности / А.А. Атамов // Экономика и социум. – 2021. – Т. 1, № 2 (81). – С. 499–501.
12. Осипова, Н.Н. Обоснование применения композитных баллонов в коммунально-бытовом обеспечении потребителей газом / Н.Н. Осипова, Д.С. Яковлев // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2024. – Т. 9, № 3. – С. 27–37. – URL: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-3-27-37>.



1. Composite Cylinder Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report by Cylinder: Global Opportunity // Analysis and Industry Forecast. 2021-2030. – CP: Storage And Distribution, 2022. – 353 p.
2. Tultsov, V.A. Application of composite gas cylinders for gas supply to consumers / V.A. Tultsov // Improvement of methods of hydraulic calculations of culverts and treatment facilities. – 2019. – Vol. 1, No. 1 (44). – P. 115–118.
3. Liquefied Petroleum Gas Cylinder Market by Type, End-user and Geography // Oil & Gas Storage & Transportation. Forecast and Analysis 2023-2027. – 2023. – 162 p.
4. LPG Composite Cylinders Market Outlook Report – Industry Size, Trends, Insights, Market Share, Competition, Opportunities, and Growth Forecasts by Segments, 2022 to 2030. – Region: Global, 2023. – 146 p.
5. Composite cylinders use and handling in the propane industry // Propane Education & Research. – 2022. – 16 p.
6. Tripathi, A. Design and Analysis of a Composite Cylinder for the Storage of Liquefied Gases / A. Tripathi, A. Kumar, M. K. Chandrakar // International Journal for Scientific Research & Development. – 2017. – Vol. 5 (03). – P. 871–876.
7. Abdirashidov, A.A. Analysis of composite polymer materials used in high pressure gas cylinders / A.A. Abdirashidov, N.K. Nurqobilov // European Scholar Journal (ESJ). – 2021. – Vol. 2 (1). – P. 27–28. – URL: <https://www.scholarzest.com>
8. Rachevsky, B.S. Forecast and elimination of explosions of cylinders with liquefied hydrocarbon gas / B.S. Rachevsky // Labor safety in industry. – 2018. – No. 7. – P. 43–46.
9. Shenogin, M.V. Measures to reduce the accident rate of household gas cylinders with liquefied hydrocarbon gases / M.V. Shenogin // Innovations and investments. – 2018. – No. 12. – P. 204–209.
10. Nedlin, M.S. On the safety of cylinder LPG installations / M.S. Nedlin // Fakel. – 2014. – No.2. – P. 16–18.
11. Atamov, A.A. Liquid gas supply and household safety measures / A.A. Atamov // Economy and Society. – 2021. – Vol. 1. – No 2 (81). – P. 499–501.
12. Osipova, N.N. Rationale for the use of composite cylinders in the municipal supply of gas to consumers / N.N. Osipova, D.S. Yakovlev // Bulletin of the Belgorod State Technological University. – 2024. – Vol. 9, No. 3. – P. 27–37. – URL: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-3-27-37>.

УДК 697

DOI 10.54734/20722958\_2025\_1\_177

Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства  
Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Баканова Светлана Викторовна**,  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Теплогасоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: SvBakanova@mail.ru

Penza State University of Architecture  
and Construction  
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Bakanova Svetlana Viktorovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the Department «Heat, gas supply and  
ventilation»  
E-mail: SvBakanova@mail.ru

## ВОЗДУХООБМЕН В ПОМЕЩЕНИЯХ ХРАНЕНИЯ СКОРОПОРТЯЩЕЙСЯ ПРОДУКЦИИ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

С.В. Баканова

Предлагается методика определения воздухообмена в помещениях хранения скоропортящейся продукции для горизонтальных систем воздухораспределения. Учитывается неравномерность формирования скоростных полей вблизи воздуховыпускных отверстий для основного режима изотермического хранения. Расчёт общего сопротивления системы производится с учётом определения приведённых коэффициентов аэродинамических сопротивлений по графическим зависимостям, полученным экспериментальным путем.

*Ключевые слова:* хранение скоропортящейся продукции, воздухообмен, горизонтальные системы воздухораспределения, пористый слой, начальные условия истечения воздуха

## AIR EXCHANGE IN THE STORAGE ROOMS OF PERISHABLE PRODUCTS WITH A HORIZONTAL AIR DISTRIBUTION SYSTEM

S.V. Bakanova

A method for determining air exchange in perishable products storage rooms for horizontal air distribution systems is proposed. The uneven formation of velocity fields near the air outlets for the main mode of isothermal storage is taken into account. The calculation of the total drag of the system is performed taking into account the determination of the reduced aerodynamic drag coefficients based on graphical dependencies obtained experimentally.

*Keywords:* storage of perishable products, air exchange, horizontal air distribution systems, porous layer, initial conditions of air outflow

Процесс движения воздушного потока через пористый слой штабеля или насыпи хранимой плодоовощной продукции всё ещё остается не изученным до конца. Прежде всего это объясняется сложными аэродинамическими и теплообменными процессами [3]. Беспорядочность форм и размеров поровых каналов, находящихся в штабеле и насыпи хранимой продукции, приводит к тому, что вектор локальной скорости воздушного потока существенно меняет свою величину и направление. Наблюдается неравномерное распределение параметров воздуха. Неверно организованное вентилирование может усугубить это явление [1]. Известно, что начальные условия истечения воздуха в слой продукции более всего влияют на процесс воздухораспределения. Результаты выполненных исследований влияния начальных условий истечения воздуха в слой продукции с насыпной структурой на равномерность распределения позволяют более обоснованно подойти к выбору конструктивного оформления и размеров приточного отверстия, а также шага между ними (при параллельном выпуске воздуха) в зависимости от размеров элементов загрузки. Это дает возможность уже

при проектировании получить достоверные сведения по качественному хранению продукции насыпью (например плодоовощной) с учетом неравномерности формирования скоростных и температурных полей вблизи воздуховыпускных отверстий как в вертикальных, так и в горизонтальных системах воздухораспределения [2].

Ниже предлагается методика расчета горизонтальной системы воздухораспределения с образованием струйных выпусков в слое насыпной продукции (“дышащей” и “недышащей”).

В задачу расчета горизонтальной системы воздухораспределения с раздачей воздуха через крупногабаритные отверстия боковых панелей (рис. 1) входят: определение проектного воздухообмена для основного режима изотермического хранения, общего аэродинамического сопротивления системы, обоснование необходимости конструктивного оформления, числа, размеров и взаимного расположения приточных отверстий.

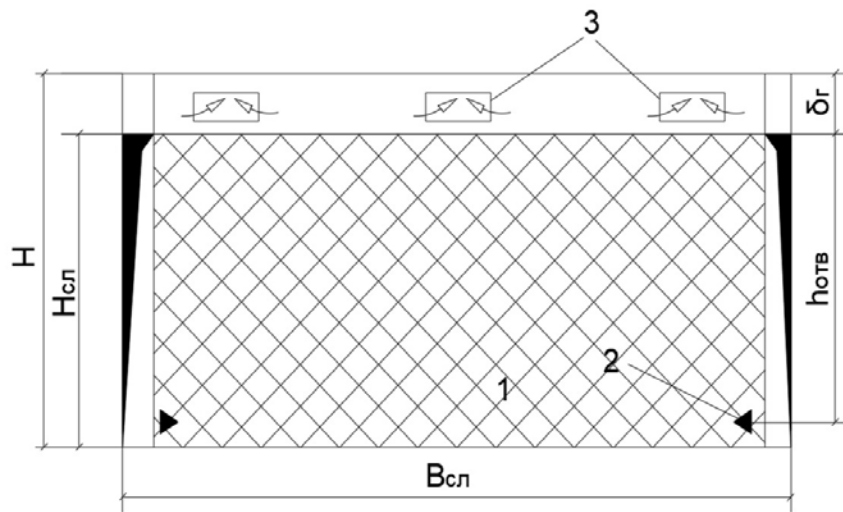


Рис. 1. Схема к расчету горизонтальной системы воздухораспределения:  
1 – слой продукции; 2, 3 – приточные и вытяжные отверстия, соответственно

Расчёт ведется в следующей последовательности.

1. Определяется воздухообмен, необходимый для отвода тепловыделений от продукции в режиме изотермического хранения и внешних тепlopоступлений через горизонтальные (нижнее и верхнее) наружные ограждения:

$$G = \frac{K(Q_{п.тр.} + Q_{прод.})}{C_p \cdot \Delta t^H}, \text{ кг/с}, \quad (1)$$

где  $Q_{п.тр.}$  – количество тепла, поступающего в грузовое помещение через горизонтальные наружные ограждения, Вт;  $Q_{прод.}$  – тепловыделение от “дышащей” продукции в режиме изотермического хранения, Вт;  $\Delta t^H$  – нормируемая разность температур, °С;  $C_p$  – удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $K$  – поправочный множитель, учитывающий особенности циркуляции фильтрационных потоков в рассматриваемой схеме воздухораспределения. Получен на основе экспериментальных данных,

$$K = \left[ 1 + \left( 1 + \varepsilon \frac{H_{сл.}}{\delta_r} \sqrt{\frac{H_{сл.} \cdot \delta_r^2 \cdot d_3}{(B_{сл.} + 2H_{сл.}) \delta_b^3}} \right)^{-1} \right];$$

здесь  $\delta_r$  – высота горизонтального байпаса над слоем, м;  $\delta_b$  – величина возможного вертикального зазора между слоем продукции и воздухораспределительными

панелями, м;  $\varepsilon$  – коэффициент пористости слоя,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $d_3$  – эквивалентный диаметр поровых каналов, м.

Объемный часовой расход приточного воздуха

$$V = 3600 \frac{G}{\rho_{\text{пр}}}, \text{ м}^3/\text{ч}.$$

2. Рассчитывается площадь приточного отверстия  $f_0$  и принимаются его размеры –  $a_0 \times b_0$ , м:

$$f_0 = 52,13 H_{\text{сл}}^2 \cdot \overline{f_0}^2, \text{ м}^2, \quad (2)$$

где  $\overline{f_0}$  – степень стеснения приточной струи. Назначается в пределах  $0,005 \div 0,02$ .

3. Вычисляется относительный размер элементов пористого слоя:

$$\overline{d}_{\text{э.с.л.}} = \frac{d_{\text{э.с.л.}}}{d_0}, \quad (3)$$

где  $d_{\text{э.с.л.}}$  – средний или эквивалентный диаметр элементов пористого слоя, м;  $d_0$  – диаметр или эквивалентный по площади диаметр ( $d_0 = 1,13 \sqrt{f_0^2}$ ) воздуховыпускного отверстия, м.

Если  $\overline{d}_{\text{э.с.л.}} > 0,6$ , то выпуск воздуха реализуется через простое отверстие, затянутое сеткой. Если  $\overline{d}_{\text{э.с.л.}} < 0,6$ , то в отверстии необходимо устанавливать воздухораспределитель с направленным распределением расхода воздуха. При этом следует учитывать, что за счет выбора значений параметров  $\overline{f_0}$  можно изменить  $\overline{d}_{\text{э.с.л.}}$ .

4. Выявляется влияние начальной неравномерности воздушного потока на сохранность продукции.

Учитываются способ хранения продукции (насыпью или в таре), ее лежкоспособность и конструктивные особенности тары.

Первый вариант, когда зоны с неблагоприятными условиями для сохранности продукции выявляются из сопоставления фактической подвижности с нижним и верхним нормируемыми пределами подвижности (хранение продукции насыпью или в негерметичной таре). Для этого случая выявляются зоны вблизи приточных отверстий, в которых утрачивается непосредственно действие приточного факела (зона 2 на рис.2).

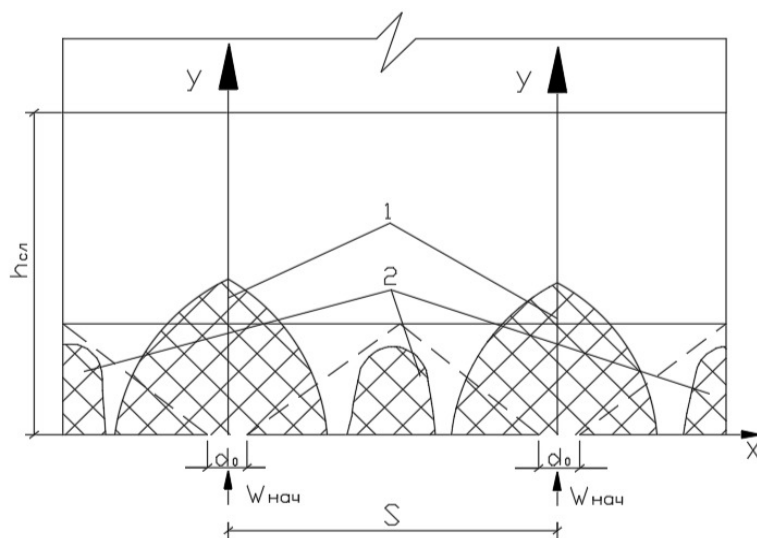


Рис. 2. Профиль зон в насыпном монодисперсном слое, в пределах которых скорость не соответствует нормируемым значениям

Второй вариант, когда зоны с неблагоприятными условиями для сохранности продукции выявляются из сопоставления фактической подвижности только с нижним нормируемым пределом подвижности (зона 2 на рис. 2), так как верхний предел не ограничивается (хранение продукции в герметичной таре, например рыбопродукции).

В качестве безразмерного параметра скорости фильтрационного потока в расчётах принимается отношение скорости (фактической или нормируемой  $W_n$ ) оттекания потоком элемента, образующего пористый слой, к скорости выровненного потока  $W_\infty$ . Скорость выровненного потока в слое  $W_\infty$  определяется из условия потребного воздухообмена по известной формуле:

$$W_\infty = \frac{V}{3600 \cdot F_{\text{пом}} \cdot \varepsilon}, \text{ м/с.} \quad (4)$$

Зоны, где локальные скорости превышают верхний предел допустимых значений, выявляются из условия  $W / W_\infty > W_n^{\text{max}} / W_\infty$ . Зоны, определяющие объем продукции, находящейся в неблагоприятных температурных условиях хранения, выявляются из условия  $W / W_\infty < W_n^{\text{min}} / W_\infty$  (фактическая скорость меньше нижнего предела нормируемой величины). Для определения границ этих зон необходимо знать, как изменится безразмерная величина локальной скорости  $W / W_\infty$  в зависимости от безразмерных координат  $\bar{y} = y / d_F$  и  $\bar{x} = x / d_F$  (см. рис. 2), где  $d_F$  – эквивалентный диаметр поперечного сечения пористого слоя в расчете на один выпуск.

Для практических расчётов связь между параметрами  $W / W_\infty$ ,  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  в диапазоне изменения  $\bar{f}_0 = 0,001 \div 0,02$  и  $Re_0 = 30 \cdot 10^3 \div 200 \cdot 10^3$  может быть представлена в виде уравнения, полученного автором, для  $\bar{d}_{\text{э.с.л.}} \geq 0,6$  и для  $\bar{d}_{\text{э.с.л.}} < 0,6$ .

$$W / W_\infty = 1,79 - 3,98\bar{y} - 5,79\bar{x} + 12,02\bar{x} \times \bar{y} + 5,28\bar{y}^2 + 9,63\bar{x}^2. \quad (5)$$

Зная сочетания параметров  $\bar{y}$ ,  $\bar{x}$  на границах зон, с помощью графического построения выявляют области, где скорости не соответствуют нормируемым значениям. При этом определяется и доля объема продукции, находящейся в неблагоприятных условиях:

$$\psi = \frac{\sum v_{\text{зон}}}{v} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где  $\sum v_{\text{зон}}$  – объем продукции, находящейся в зонах с неблагоприятными условиями хранения;  $v$  – общий объем продукции.

Шаг  $S$  между центрами приточных отверстий вычисляем из выражения

$$S = 7,22 \sqrt{f_0}, \text{ м.} \quad (7)$$

Находим число приточных отверстий на одну воздухораспределительную панель:

$$n = \frac{L}{S}, \text{ шт.} \quad (8)$$

5. Определяется высота заглубления приточных отверстий (от оси до верха слоя):

$$h_{\text{отв}} = H_{\text{сл}} - 1,13 \sqrt{f_0}, \text{ м,} \quad (9)$$

при выполнении условия  $h_{\text{отв}} / 0,5B \geq 0,3$ .

6. Рассчитываются потери давления в системе воздухораспределения. В общем случае потери давления определяются из выражения

$$P = P_{\text{возд}} + P_{\text{вх}} + P_{\text{вых}} + P_{\text{сл}} + P_{\text{выт}}, \text{ Па}, \quad (10)$$

где  $P_{\text{возд}}$ ,  $P_{\text{выт}}$  – потери давления в воздухоподающей панели до входа воздуха в слой продукции и в вытяжных отверстиях над слоем, соответственно, Па. Определяются по аэродинамическому расчету конкретно для принятой схемы организации выпуска воздуха в слой и его удаления;  $P_{\text{вх}}$ ,  $P_{\text{вых}}$ ,  $P_{\text{сл}}$  – потери давления на истечение воздуха в слой продукции, выход из него и потери в слое, Па,

$$P_{\text{вх}} = \xi_{\text{вх}} \frac{W_{\text{нач}}^2 \cdot \rho_{\text{в}}}{2}, \quad P_{\text{сл}} = \xi_{\text{сл}} \frac{W_{\text{сл}}^2 \cdot \rho_{\text{в}}}{2}, \quad P_{\text{выт}} = \xi_{\text{выт}} \frac{W_{\infty}^2 \cdot \rho_{\text{в}}}{2}; \quad (11)$$

здесь  $W_{\text{нач}} = \frac{G}{2 \cdot \rho_{\text{в}} \cdot n \cdot f_0}$  – скорость воздуха в приточном отверстии, м/с;

$W_{\text{сл}} = \frac{G}{2 \cdot \rho_{\text{в}} \cdot L \cdot H \cdot \varepsilon}$  – скорость обтекания воздушным потоком элементов пористого

слоя, м/с;  $\xi_{\text{вх}}$ ,  $\xi_{\text{выт}}$ ,  $\xi_{\text{сл}}$  – приведенные коэффициенты аэродинамического сопротивления истечению воздуха в слой продукции, выходу из него и в слое. Определяются по графическим зависимостям, полученным экспериментальным путем и представленным на рис. 3.

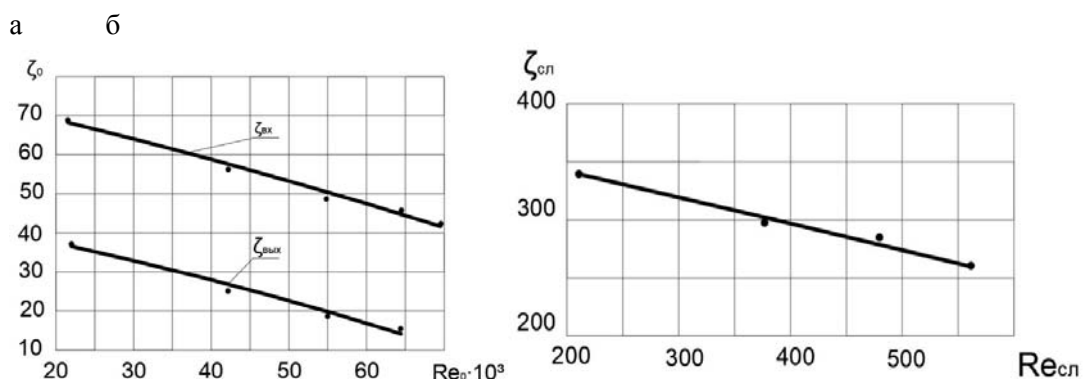


Рис. 3. К определению приведенных коэффициентов сопротивления:  
а – на истечение потока в слой ( $\xi_{\text{вх}}$ ) и на выход из него ( $\xi_{\text{выт}}$ ); б – насыпного слоя  $\xi_{\text{сл}}$

### Выводы

1. Предлагается методика определения воздухообмена в помещениях хранения скоропортящейся продукции для горизонтальной системы воздухораспределения.
2. Для основного режима изотермического хранения учитывается неравномерность формирования скоростных полей вблизи воздуховыпускных отверстий.
3. Приведенные коэффициенты аэродинамического сопротивления предлагается определять по графическим зависимостям, полученным экспериментальным путем.

### Список литературы

1. Баканова, С.В. Методика оценки эффективности воздухораспределения и определения воздухообмена в помещениях хранения скоропортящейся продукции / С.В. Баканова, А.И. Еремкин // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – №2. – С.130–135.

2. Баканова, С.В. Фильтрация вентиляционного воздуха через монодисперсный слой при различных условиях истечения потока / С.В. Баканова // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – №2. – С.175–180.

3. Микроклимат производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений: монография / В.И. Бодров, М.В. Бодров, Е.Г. Ионычев, М.М. Кучеренко; под общей редакцией В.И. Бодрова. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2008. – 623 с.

#### References

1. Bakanova, S.V. Methodology for evaluating the effectiveness of air distribution and determining air exchange in the storage rooms of perishable products / S.V. Bakanova, A.I. Eremkin// Regional architecture and construction. – 2015. – No.2. – P.130–135.

2. Bakanova, S.V. Filtration of ventilation air through a monodisperse layer under various flow conditions / S.V. Bakanova// Regional architecture and construction. – 2011. – No.2. – P.175–180.

3. Microclimate of industrial agricultural buildings and structures: monograph / V.I. Bodrov, M.V. Bodrov, E.G. Ionychev, M.M. Kucherenko; under the general editorship of V.I. Bodrov. – Nizhniy Novgorod: NNGASU, 2008. – 623 p.

УДК 697 : 51.7

DOI 10.54734/20722958\_2025\_1\_183

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*  
Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Кузина Валентина Владимировна**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Информационно-  
вычислительные системы»  
E-mail: kuzina@pguas.ru

**Ерёмкин Александр Иванович**,  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Теплогазоснабжение  
и вентиляция»  
E-mail: eremkin@pguas.ru

**Кошев Александр Николаевич**,  
доктор химических наук, профессор  
кафедры «Информационно-  
вычислительные системы», действительный  
член Нью-Йоркской академии наук  
*Пензенский государственный университет*  
Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, д.40,  
тел.: (8412) 36-82-09

**Пономарева Инна Константиновна**,  
кандидат экономических наук,  
доцент кафедры «Информационное  
обеспечение управления и производства»  
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*  
Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Kuzina Valentina Vladimirovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the Department «Information and  
Computing Systems»  
E-mail: kuzina@pguas.ru

**Eremkin Aleksander Ivanovich**,  
Doctor of Sciences, Professor,  
Head of the Department «Heat, Gas Supply  
and Ventilation»  
E-mail: eremkin@pguas.ru

**Koshev Aleksander Nikolaevich**,  
Doctor of Chemical Sciences, Professor of the  
Department «Information and Computing  
Systems», Full member of the New York  
Academy of Sciences  
*Penza State university*  
Russia, 440026, Penza, 40, Krasnaya St.,  
tel.: (8412) 36-82-09

**Ponomareva Inna Konstantinovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the Department «Information Support  
Management and Production»  
E-mail: inna.ok007@rambler.ru

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И СКОРОСТНЫХ ПОЛЕЙ В КОНВЕКТИВНЫХ ПОТОКАХ ОТ НАГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОТОПИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА

В.В. Кузина, А.И. Еремкин, И.К. Пономарева, А.Н. Кошев

Приведены результаты исследования температурных и скоростных полей в конвективных потоках от нагретой поверхности отопительного прибора методом математического моделирования. Выполнены расчеты распределения скорости и температуры тепловых потоков от нагревательного прибора, расположенного у стены и на некотором расстоянии от нее, при наличии технического устройства в виде теплоотражающего экрана и без него. Показано хорошее соответствие результатов расчета экспериментальным данным.

*Ключевые слова: тепловой поток, конвекция, температурные поля, скоростные поля, теплоотражающий экран, математическое моделирование*

## MATHEMATICAL MODELING OF TEMPERATURE AND VELOCITY FIELDS IN CONVECTIVE FLOWS FROM THE HEATED SURFACE OF A HEATER

V.V. Kuzina, A.I. Eremkin, I.K. Ponomareva, A.N. Koshev

The results of the study of temperature and velocity fields in convective flows from the heated surface of a heater by the method of mathematical modeling are given. Calculations of velocity and temperature distribution of heat flows from the heater located near the wall and at some distance from it in the presence of a technical device in the form of a heat-reflecting screen and without it are performed. The good agreement of the calculation results to the experimental data is shown.

*Keywords: heat flow, convection, temperature fields, velocity fields, heat shield, mathematical modeling*



**Постановка задачи.** Целью работы является расчет конвективного потока воздуха, образованного от нагретой поверхности отопительного прибора. Расчет профиля избыточных температур  $T$ , °С, и профиля скоростей  $V$ , м/с, в точках поперечного сечения полуограниченного настилающегося конвективного потока можно производить в соответствии с преобразованными уравнениями Навье – Стокса, используемыми при решении задач теплофизики [4–6]. Струя конвективного потока, образованная нагретой поверхностью отопительного прибора, поднимается вдоль и настилается на внутреннюю поверхность наружной стены или на некотором расстоянии от нее, частично размываясь в плоскости поперечного сечения от вертикальной оси струи в сторону помещения.

Распределение скорости и температуры в струе конвективного потока имеет сложный характер, обусловленный ламинарной и турбулентной составляющими, разнонаправленными движениями воздуха за счет конвективной и тепловой диффузии и другими физическими факторами [7–10]. Здесь ограничимся математической моделью, когда конвективный поток обуславливается разностью температур между нагретой поверхностью отопительного прибора и окружающего воздуха.

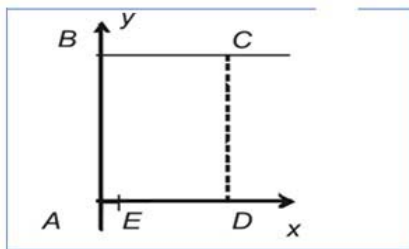


Рис. 1. Схематичное изображение расчетной области

Будем считать, что размеры нагретой поверхности отопительного прибора малы в сравнении с размерами обогреваемого помещения и источник тепла можно считать точечным источником. В этом случае для расчета плоской вертикальной струи достаточно двух координат: вертикальной координаты, направленной вверх вдоль стены  $y$ , и горизонтальной  $x$ , направленной к стене и от стены в сторону помещения. На рис. 1 представлена схема плоской расчетной области.

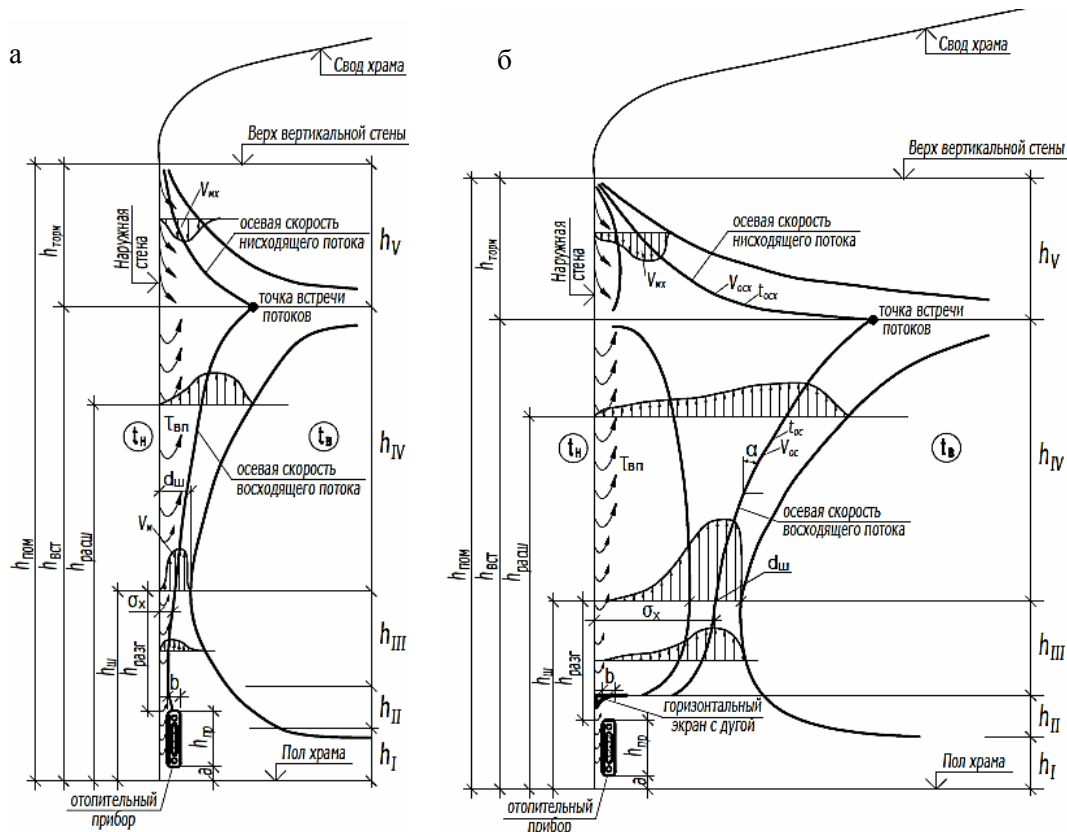


Рис. 2. Схема движения нагретого воздуха в конвективном потоке от поверхности отопительного прибора:

- 1 – отопительный прибор; 2 – нагретый конвективный поток;
- а – отопительный прибор без теплоотражающего экрана; б – то же с теплоотражающим экраном

Положение отопительного прибора характеризуется точкой  $A$  (см. рис. 1), когда обогреватель расположен вплотную к вертикальной стене, и точкой  $E$ , когда прибор отнесен от стены на некоторое расстояние. Будем считать, что положение источника тепла ( $E$ ) характерно также для случая, когда прибор расположен у стены, но над прибором размещен теплоотражающий экран размера длины отрезка  $AE$  (рис. 2, б). Данный экран отклоняет восходящий конвективный поток от внутренней поверхности наружной стены в сторону помещения. В результате образуется свободный конвективный поток.

**Математическая модель.** При составлении моделирующих уравнений и проведении численных расчетов используем классические законы сохранения количества движения и массы, выражением которых являются стационарные уравнения: уравнение Навье – Стокса, уравнение неразрывности и температурного поля [4, 5]. Для рассматриваемого нами случая справедливо:

$$V_y \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial y} + k_1 T + k_2 V_y \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial y} = 0; \quad (2)$$

$$V_y \frac{\partial T}{\partial x} + V_x \frac{\partial T}{\partial y} + k_2 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = 0. \quad (3)$$

В уравнениях (1)–(3)  $V = (V_x, V_y)$  – вектор скорости движения нагретого воздуха;  $V_x$  – горизонтальная составляющая  $V$ ;  $V_y$  – вертикальная составляющая  $V$ ;  $T(x,y)$  – температура воздуха в рассматриваемой области (см. рис. 1).

Систему дифференциальных уравнений (1)–(3) необходимо дополнить естественными граничными условиями, характеризующими поведение искомых функций  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $T$  на границах области расчетов, аналогичными условиям, приведенным, например, в монографии [5].

Анализ значений скорости перемещения нагретого воздуха и его температуры в произвольном горизонтальном сечении пристенного пространства помещения [4, 5, 7, 8] позволяет использовать их для математического описания распределения скорости и температуры в виде кривых закона нормального распределения с некоторыми заданными характеристиками  $p$  и  $\sigma$ , которые можно определить посредством математической обработки экспериментальных кривых. Здесь  $T_x$ ,  $T_y$  – распределение температуры воздуха соответственно в горизонтальном и вертикальном сечении при заданных значениях  $y$  или  $x$ .

$$V_x = V_y e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x}{py} \right)^2}; \quad (4)$$

$$T_x = T_y e^{-\frac{\sigma}{2} \left( \frac{x}{py} \right)^2}. \quad (5)$$

**Метод решения.** Преобразование уравнений в системе (1) – (3) с использованием выражений (4), (5) позволяет получить систему двух уравнений с двумя неизвестными функциями  $V_x$ ,  $T_x$ , зависящими от двух переменных ( $x,y$ ):

$$V_x e^{\frac{1}{2} \left( \frac{x}{py} \right)^2} \left( \frac{\partial V_x}{\partial x} e^{\frac{1}{2} \left( \frac{x}{py} \right)^2} + V_x e^{\frac{1}{2} \left( \frac{x}{py} \right)^2} \frac{1}{py} \right) + V_x \frac{\partial V_x}{\partial y} + k_1 T_x + k_2 \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} = 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} e^{\frac{1}{2} \left( \frac{x}{py} \right)^2} + V_x e^{\frac{1}{2} \left( \frac{x}{py} \right)^2} \frac{1}{py} + \frac{\partial V_x}{\partial y} = 0; \quad (7)$$

$$V_x e^{\frac{1}{2}\left(\frac{x}{py}\right)^2} \frac{\partial T_x}{\partial x} + V_x \frac{\partial T_x}{\partial y} + k_2 \frac{\partial^2 T_x}{\partial x^2} = 0. \quad (8)$$

Уравнения (6)–(8) решались разностным методом сеток. Для аппроксимации производных использовалась регулярная квадратная сетка. Посредством разностного представления частных производных получена система линейных алгебраических уравнений, соответствующая системе (1)–(3):

$$\bar{A} \cdot \bar{C} = \bar{f}, \quad (9)$$

где  $\bar{A}$  – матрица коэффициентов при векторе неизвестных  $\bar{C}$ , соответствующем векторам разностного представления неизвестных функций  $V_x, V_y, T$ ;  $\bar{f}$  – вектор-столбец свободных членов. Полная развернутая запись системы линейных алгебраических уравнений (9) в данной работе не приводится в силу ее громоздкости.

Для решения системы (9) был выбран метод Зейделя, для реализации которого система была приведена к виду:

$$\bar{C}^{n+1} = \bar{D}^{-1} (-\bar{M} \cdot \bar{C}^{n+1} - \bar{N} \cdot \bar{C}^n + \bar{f}), \quad (10)$$

где  $\bar{C}^n$  – вектор неизвестных, найденный на  $n$ -й итерации;  $\bar{D}$  – диагональная матрица;  $\bar{M}$ ,  $\bar{N}$  – соответственно нижняя и верхняя треугольные матрицы, такие, что  $\bar{A} = \bar{D} + \bar{M} + \bar{N}$ . Численная реализация метода Зейделя для рассматриваемого класса задач показала его хорошую сходимость к решению за приемлемое количество вычислительных итераций. Для решения системы матрицы коэффициентов преобразовывались в одномерные массивы без нулевых элементов с указанием в векторной форме номеров этих элементов (номера строки и столбца, где расположен элемент). Такое представление позволило использовать стандартную процедуру для быстрого решения по методу Зейделя из библиотеки стандартных подпрограмм для современной версии алгоритмического языка *Fortran*. Граничные условия для решения системы дифференциальных уравнений (7)–(8) в области, изображенной на рис. 1, запишем следующим образом:

$$1. \quad x = A \ (x = E), \ y = 0 \rightarrow V_x = V_y = 0; \ T = t_n; \ \frac{\partial V_y}{\partial y} = \frac{\partial T_y}{\partial y} = 0;$$

$$A \leq x \leq D, \ x \neq A \ (x \neq E), \ y = 0 \rightarrow V_x = V_y = 0; \ T = t_b; \ \frac{\partial V_y}{\partial y} = \frac{\partial T_y}{\partial y} = 0;$$

$$2. \quad x = D, \ D \leq y \leq C \rightarrow V_x = V_y = 0; \ T = t_b; \ \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0;$$

$$3. \quad y = B, \ A \leq x \leq D \rightarrow V_x = V_y = 0; \ T = t_b; \ \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0;$$

$$4. \quad x = A, \ A \leq y \leq B \rightarrow \frac{\partial V_x}{\partial x} = 0; \ \frac{\partial T_x}{\partial x} = 0.$$

Здесь  $t_n$  – температура источника;  $t_b$  – температура окружающего воздуха.

При проведении расчетов были приняты следующие размеры расчетной области:  $AE = 0,4$  м;  $AD = 3$  м;  $AB = DC = 3$  м;  $BC = 3$  м;  $\sigma = 0,8$ ;  $c = 0,3$ .

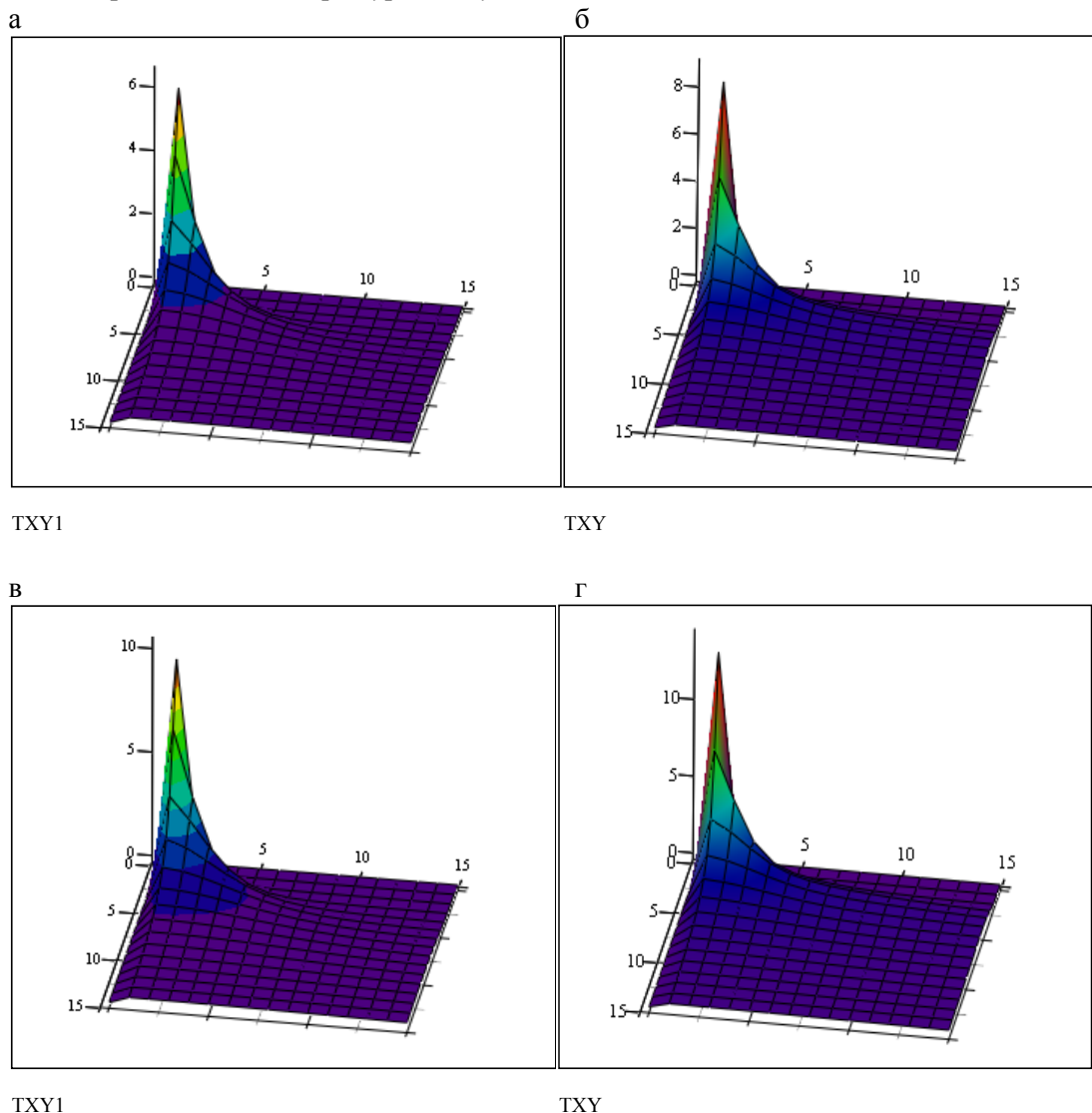
**Результаты расчетов.***Распределение температуры воздушного потока.*

Рис. 3. Поверхности распределения избыточной температуры, когда источник тепла защищен сверху горизонтальным тепловым экраном длиной 0,3 м (а, в) и без защитного экрана (б, г): а, б – мощность теплового источника 500 Вт; в, г – мощность теплового источника 1000 Вт

Результаты, представленные на рис. 3, 4, показывают, что использование теплоотражающего экрана позволяет существенно понизить температурные характеристики пристенного пространства, что является важным для недопущения конденсации влаги на внутренней поверхности стены и обеспечения сохранности убранства, расположенного вплотную на внутренней поверхности стены.

Как следует из графиков, при мощности источника 500 Вт без экрана максимальное значение температуры воздуха  $t_{\max} = 28,9$  °С наблюдается на высоте 0,2 м от поверхности отопительного прибора и на расстоянии 0,2 м от стены. При наличии теплоотражающего экрана  $t_{\max} = 26,47$  °С.

При мощности источника 1000 Вт без экрана максимальное значение температуры воздуха  $t_{\max} = 34,2$  °С наблюдается на высоте 0,2 м от поверхности отопительного прибора и на расстоянии 0,2 м от стены. При наличии теплоотражающего экрана  $t_{\max} = 30,3$  °С.

Аналогично при мощности 500 Вт скорость воздушного потока (рис. 5, 6)  $v_{\max} = 0,59$  без экрана,  $v_{\max} = 0,36$  с экраном.

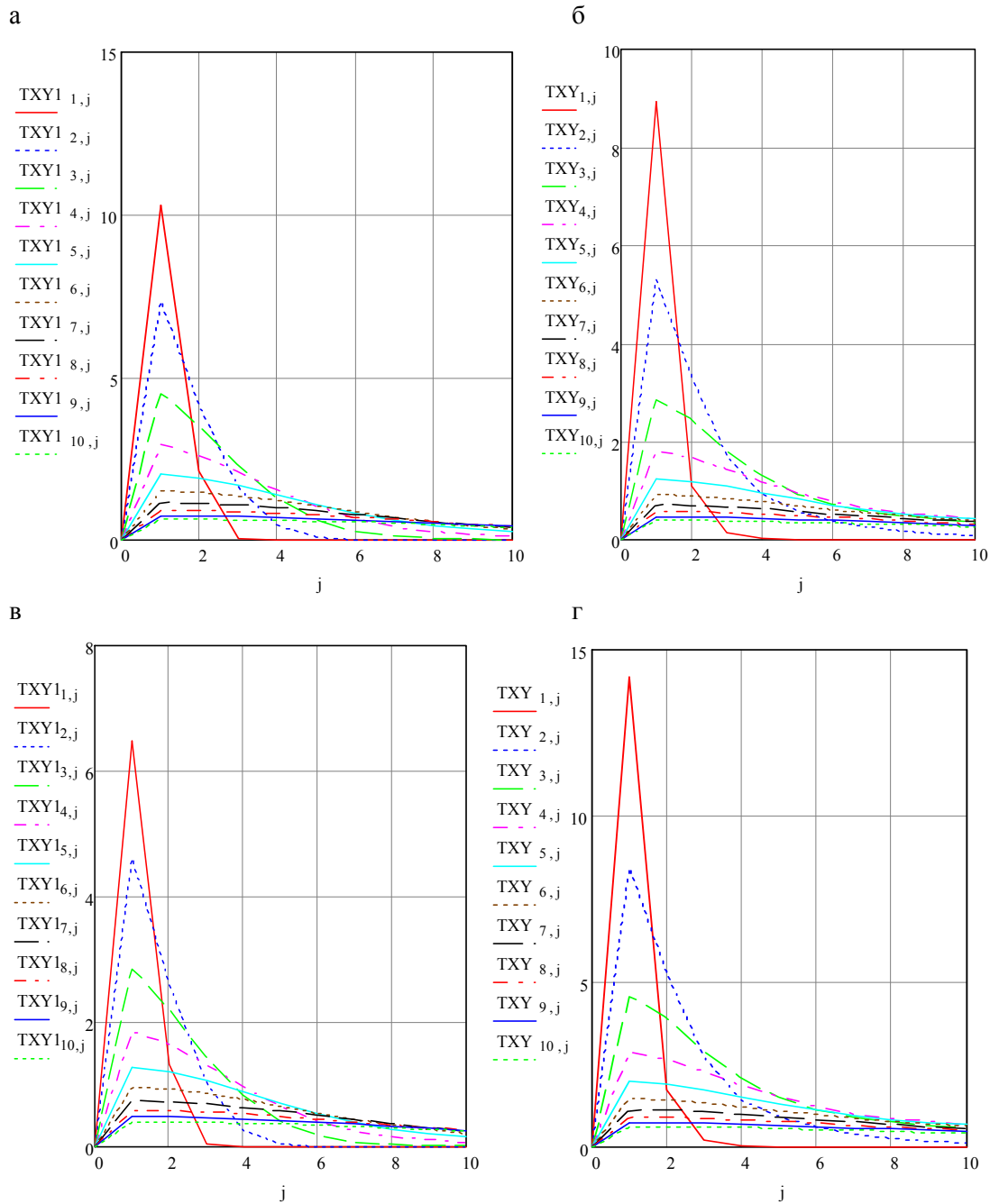


Рис. 4. Распределение избыточной температуры:

а, в – источник тепла защищен сверху горизонтальным теплоотражающим экраном длиной 0,3 м;  
 б, г – без защитного экрана. Мощность теплового источника, Вт: 500 (а, б); 1000 (в, г).  
 Оси:  $OX$  – координата от стены внутрь помещения, шаг 0,2 м;  $OY$  – избыточная температура.  
 В кривых  $TXY_{i,j}$  и  $TXY_{ij}$  индекс  $i$  указывает на координату по высоте помещения ( $y = i \cdot 0,2$  м)

С источником тепла мощностью 1000 Вт максимальные значения скорости воздушного потока равны:  $v_{\max} = 0,74$  без экрана,  $v_{\max} = 0,46$  с экраном.

Полученные теоретические значения температуры воздуха  $t_{\max}$  над отопительным прибором на высоте 0,2 м и на расстоянии 0,2 м от стены подтверждаются экспериментальными данными в пределах до 10–15 %, что достаточно корректно для их использования в практических расчетах.

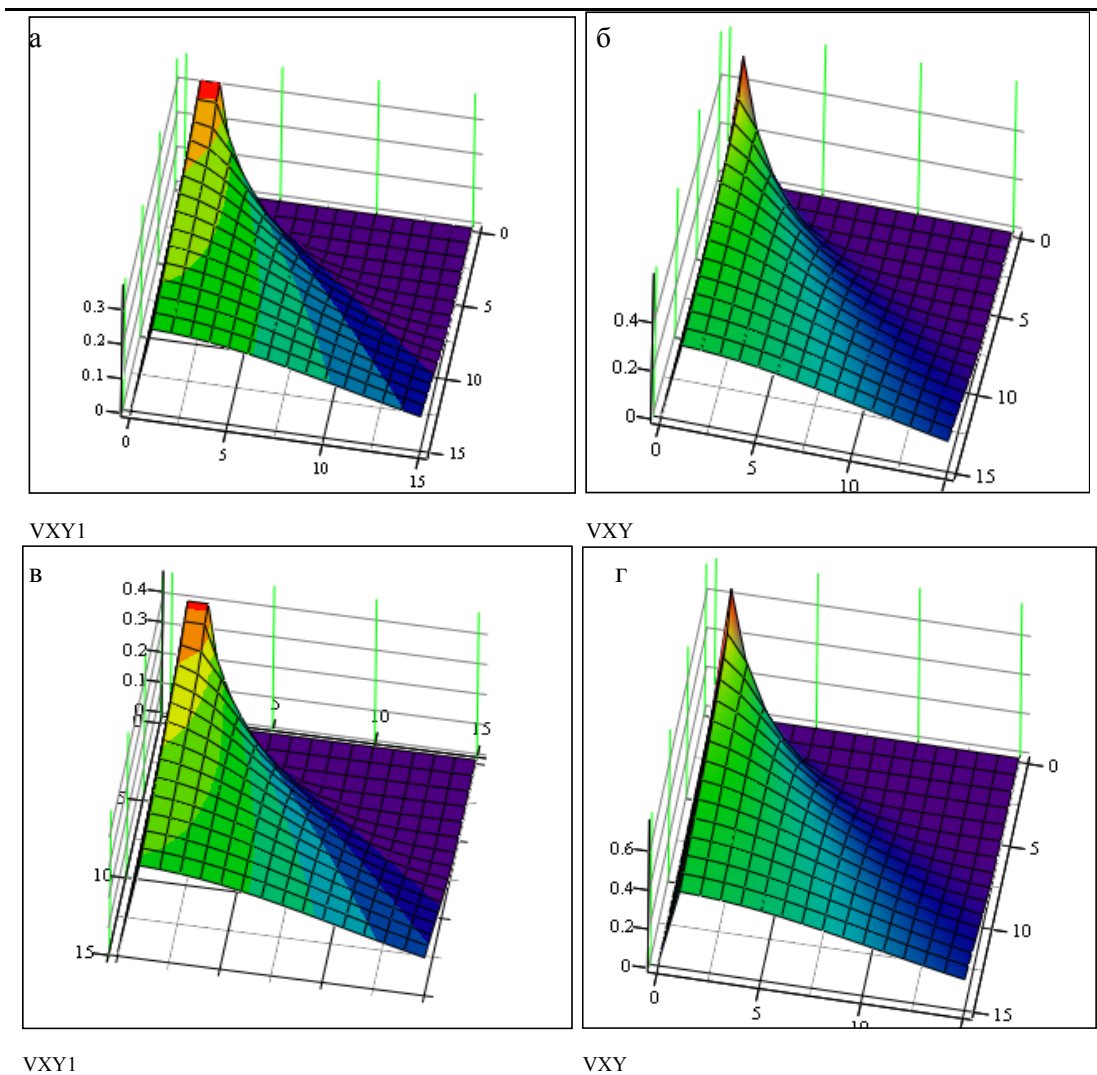


Рис. 5. Поверхности распределения скоростей воздушного потока, когда источник тепла защищен сверху горизонтальным тепловым экраном длиной 0,3 м (а, в) и без защитного экрана (б, г).  
 Мощность теплового источника, Вт: 500 (а, б); 1000 (в, г)

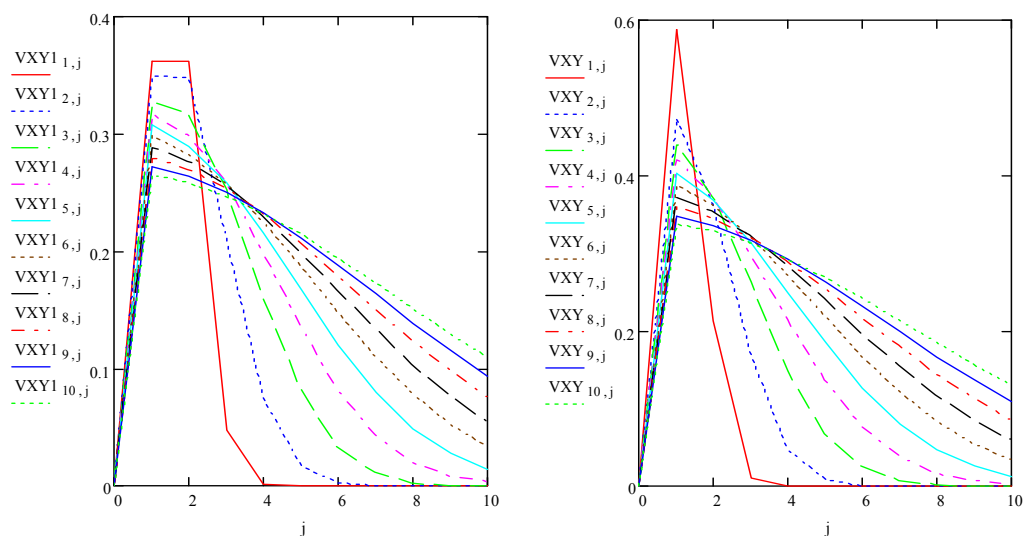


Рис. 6. Кривые распределения скоростей, когда источник тепла защищен сверху горизонтальным теплоотражающим экраном длиной 0,3 м (а, в) и без защитного экрана (б, г).  
 Мощность теплового источника, Вт: 500 (а, б); 1000 (в, г). Оси:  $Ox$  – координата от стены внутрь помещения, шаг 0,2 м;  $Oy$  – избыточная температура. В кривых  $TXY_{i,j}$  и  $VXY_{i,j}$  индекс  $i$  указывает на координату по высоте помещения ( $y = i \cdot 0,2$  м)

Приведенная математическая модель может быть использована и для других численных значений  $AE$ ,  $AD$ ,  $AB$ ,  $DC$ ,  $BC$ ,  $\sigma$ ,  $s$ . Из результатов следует, например, что при использовании горизонтального экрана над тепловым источником шириной 0,3 м скорость теплового потока вдоль стены незначительна. Когда нагреватель приставлен к стене и не экранирован, то стена интенсивно обдувается тепловым потоком, затем интенсивность быстро снижается по мере удаления от теплоносителя как в глубину помещения, так и по высоте помещения.

### Список литературы

1. Еремкин, А.И. Принципы совершенствования климатизации в православных культовых сооружениях: монография / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, И.К. Пономарева, А.А. Мишин. – Пенза: ПГУАС, 2023. – 240 с.
2. Кузина, В.В. Расчет конвективной диффузии технического углерода при горении свечей в храме в условиях вертикальной вытяжки воздуха / В.В. Кузина, Н.А. Кошев, И.К. Пономарева, А.Н. Кошев // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 4 (57). – С. 149–158.
3. Кузина, В.В. Математическое моделирование распределения конвективного потока над компактно расположенными тепловыми источниками / В.В. Кузина, А.Н. Кошев, А.И. Еремкин // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 1 (50). – С. 75–80.
4. Шепелев, И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении / И.А. Шепелев. – Москва: Стройиздат, 1978. – 145 с.
5. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика / В.Н. Богословский. – Санкт-Петербург: АВОК СЕВЕРО-ЗАПАД, 2000. – 400 с.
6. Кузина, В.В. Математическое моделирование диффузионного распределения продуктов горения свечей в храме / В.В. Кузина, А.И. Еремкин, А.Н. Кошев, И.К. Пономарева // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 3 (56). – С. 180–186.
7. Лыков, А.В. Возбуждение конвекции нагревом сверху / А.В. Лыков, Б.М. Берковский, В.Е. Фертман // Progress in Heat and Mass Transfer. Vol. 4. Pergamon Res. – 1969. – 425 с.
8. Кузина, В.В. Определение параметров конвективного потока от отопительного прибора методом математического моделирования / В.В. Кузина, А.Н. Кошев, А.И. Еремкин, И.К. Пономарева // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 2 (59). – С. 157–163.
9. Еремкин, А.И. Конвективный теплообмен и закономерность развития вертикального, полуограниченного, настилающегося потока вдоль внутренней вертикальной поверхности наружного ограждения / А.И. Еремкин, А.Г. Аверкин, К.А. Петрова, И.К. Пономарева // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 1 (58). – С. 129–137.
10. Кочев, А.Г. Создание температурных условий в православных храмах / А.Г. Кочев, М.М. Соколов, В.А. Уваров // Приволжский научный журнал. – 2023. – № 3 (67). – С. 58–65.

### References

1. Eremkin, A.I. Principles of improvement of climatization in Orthodox religious buildings: monograph / A.I. Eremkin, A.G. Averkin, I.K. Ponomareva, A.A. Mishin. – Penza: PGUAS, 2023.
2. Kuzina, V.V. Calculation of convective diffusion of technical carbon at burning of candles in a temple in conditions of vertical air extraction / V.V. Kuzina, N.A. Koshev, I.K. Ponomareva, A.N. Koshev // Regional Architecture and Engineering. – 2023. – № 4 (57). – С. 149–158.
3. Kuzina, V.V. Mathematical modeling of the convective flow distribution over the compactly located thermal sources / V.V. Kuzina, A.N. Koshev, A.I. Eremkin // Regional architecture and construction. Kuzina, A.N. Koshev, A.I. Eremkin // Regional Architecture and Engineering. – 2022. – № 1 (50). – С. 75–80.

4. Shepelev, I.A. Aerodynamics of the air flows in a room / I.A. Shepelev. – Moscow: Stroyizdat, 1978. – 145 c.
5. Bogoslovskiy, V.N. Building thermophysics / V.N. Bogoslovskiy. – Saint-Petersburg: AVOK SEVERO-ZAPAD, 2000. – 400 c.
6. Kuzina, V.V. Mathematical modeling of the diffusion distribution of the candle burning products in the temple / V.V. Kuzina, A.I. Eryomkin, A.N. Koshev, I.K. Ponomareva // Regional Architecture and Engineering. – 2023. – № 3 (56). – C. 180–186.
7. Lykov, A.V. Excitation of Convection by Heating from Above / A.V. Lykov, B.M. Berkovskiy, V.E. Fertman // Progress in Heat and Mass Transfer. Vol. 4. Pergamon Press. – 1969. – 425 c.
8. Kuzina, V.V. Determination of the convective flow parameters from the heater by mathematical modeling method / V.V. Kuzina, A.N. Koshev, A.I. Eryomkin, I.K. Ponomareva // Regional Architecture and Engineering. – 2024. – № 2 (59). – C. 157–163.
9. Yermkin, A.I. Convective heat exchange and the regularity of the vertical, semi-confined, overlapping flow development along the inner vertical surface of an external enclosure (in Russian) / A.I. Yermkin, A.G. Averkin, K.A. Petrova, I.K. Ponomareva // Regional architecture and engineering. – 2024. – № 1 (58). – C. 129–137.
10. Kochev, A.G. Creating temperature conditions in the Orthodox churches / A.G. Kochev, M.M. Sokolov, V.A. Uvarov // Volga Region Scientific Journal. – 2023. – № 3 (67). – C. 58–65.



# АРХИТЕКТУРА

# ARCHITECTURE

УДК 725

DOI 10.54734/20722958\_2025\_1\_192

*Российский университет дружбы народов  
им. Патриса Лумумбы*

г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

**Гарькин Игорь Николаевич,**

кандидат технических наук,

кандидат исторических наук, зав. кафедрой

«Архитектура, реставрация и дизайн»

E-mail: igor\_garkin@mail.ru

*Peoples' Friendship University of Russia  
named after Patrice Lumumba*

Moscow, Miklukho-Maklaya St., 6

**Garkin Igor Nikolaevich,**

Candidate of Sciences, Candidate

of Historical Sciences, Head of the

Department «Architecture, Restoration and

Design»

E-mail: igor\_garkin@mail.ru

## ИСТОРИКО-АРХИТЕКТУРНАЯ ЦЕННОСТЬ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ: МЕТОДИКА ОЦЕНКИ, ПОФАКТОРНЫЙ И ИСТОРИКО-ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

И.Н. Гарькин

В рамках оценки историко-архитектурной значимости архитектурных объектов культурного наследия предложен метод определения «генетического кода» города (аналитический, сравнительно-синтезирующий и результирующий этапы). На основе исторического системно-структурного анализа определены особенности планирования и развития исторических архитектурных объектов города на разных временных этапах. Дан пофакторный и историко-генетический анализ в определении исторического наследия как всего города в целом, так и отдельных объектов культурного наследия.

*Ключевые слова: объекты культурного наследия, архитектура, историко-архитектурная ценность, пофакторный анализ, «генетический код» города*

## HISTORICAL AND ARCHITECTURAL VALUE OF ITS CULTURAL HERITAGE OBJECTS: METHOD OF EVALUATION, FACTOR-BY-FACTOR AND HISTORICAL-GENETIC ANALYSIS

I.N. Garkin

In the context of assessing the historical and architectural significance of objects of architectural cultural heritage, a method for determining the «genetic code» of the city is proposed (analytical, comparative-synthetic and resulting stages). Based on historical systemic-structural analysis, the features of planning and development of historical architectural objects of the city at different time stages are determined. A factorial and historical-genetic analysis is given in determining the historical heritage of both the entire city as a whole and its cultural heritage objects.

*Keywords: cultural heritage objects, architecture, historical and architectural value, factorial analysis, «genetic code» of the city*

С позиций оценки историко-архитектурной ценности архитектурных объектов культурного наследия предлагается метод определения «генетического кода» города. Традиционно он определяется как сложившиеся закономерности расположения и

формы, отраженные в градостроительстве, а именно: в зданиях, пространствах и их связях, обусловленных особенностями жизни города, которые отличают его от других и определяют его ценность и уникальность. Город формируется на протяжении всего его существования под влиянием определенных обстоятельств, событий, которые накладываются на исходную ситуацию в качестве основы; вносят в нее важные изменения, дополнения, которые укореняются, консолидируются и в конечном счете становятся неотъемлемой частью городской структуры и основой для новых изменений. В нем собраны все ценные элементы и их связи в общегородской системе, которые должны быть сохранены при наличии любой восстановительно-реконструктивной трансформации (ВРТ). Данный метод определяется как комплексный процесс взаимосвязанных реставрационных и реконструктивных изменений в отдельных зданиях, открытых пространствах и городской архитектурной среде в целом для повышения ценности, целостности и перехода на новый качественный уровень (рис. 1).



Рис. 1. К определению «генетического кода» исторического города

Определение «генетического кода» города состоит из трех последовательных этапов:

– *аналитический* этап включает факторный и историко-системно-структурный анализ; состоит в определении факторов влияния на приобретенные городом особенности (существующий городской контекст) и особенности развития исторического города, его подсистем (улицы, площади, кварталы, ансамбли, исторический центр) и элементов (зданий, сооружений и открытых пространств) на разных временных этапах;

– *сравнительно-синтезирующий* этап представляет собой историко-генетический анализ для определения устойчивых черт природной, планировочной, объемно-пространственной, архитектурно-образной и функционально-типологической организации исторического города, перешедших из одного этапа его развития в другой и сохранившихся в настоящее время;

– *результатирующий* этап включает историко-генетическую схему объединения определенных устойчивых ценных и доминирующих элементов (и подсистем) и их связей; определяет объекты культурного наследия города и отличает его от других городов, а значит, это и составляет его «генетический код», поэтому должен быть сохранен при ВРТ.

Остановимся более подробно на каждом из этапов.

**Аналитический этап.** Здесь на основе факторного анализа устанавливается, какие объекты культурного наследия придают городу свои особенности; как формировался существующий городской контекст; указываются формирующие, сохраняющие, изменяющиеся факторы и фактор связи изменений. В зависимости от исходных гео-, ландшафтно-климатических условий, национально-ментального своеобразия и исторических событий формировались определенные экономические и социокультурные особенности, выделялись характерные черты в планировании размещения объектов культурного наследия и развитии города, формировался образ жизни в нем. Их анализ позволяет определить региональную и культурную принадлежность города и составляющие элементы, которые делают его уникальным (указываются формирующие, сохраняющие, изменяющиеся факторы и фактор связи изменений).

Основной формирующий фактор – *естественный* курс развития. В исследованиях учитываются: географическое положение, климат, природная среда, флора; важна ориентация на водоемы, рельеф (наличие водоемов и особенности рельефа являются основными градообразующими элементами, влияющими на выбор местоположения и формирование планировочной и объемной композиции расположения объектов культурного наследия). Ими определяются расположение основных городских доминант и акцентов, городских площадей и их формы; направления улиц и характер уличной сети и зданий (уличная сеть, ориентированная на центр, обеспечивает визуальное раскрытие доминант с разных сторон и расстояний). Как правило, центр города с основными городскими доминантами формируется на возвышенностях, вблизи водоемов. Роли водохранилища многогранны; выделяются защитная, коммуникационная, водопроводная, эстетическая и композитная [1].

Исторический центр и отдельные объекты культурного наследия архитектуры и градостроительства для российских городов имеют непосредственную связь с природной средой; образуют исторические архитектурно-ландшафтные комплексы (объясняется характерным традиционным композиционным приемом сочетания природных и искусственных компонентов в градостроительстве (нерегулярных, ландшафтных) и объемным решением с усилением природных доминант). Климатические особенности непосредственно влияют на морфологию зданий, определяют форму кровель, пластичность фасадов, которые должны защищать людей от неблагоприятных погодных условий и обеспечить их длительное пребывание в открытом городском пространстве с учетом особенностей материалов для строительства и отделки. Очевидна роль цвета, фактуры и соответствующих конструктивных решений при определении региональной принадлежности города, а в сочетании с природными и ландшафтными особенностями – его уникальность [2].

*Историко-политический фактор* является формирующим и изменяющимся; формирующий компонент – влияние исторических личностей, изменяющийся компо-

нент – влияние исторических событий. Это влияние проявляется в правовых, управленческих, социокультурных и экономических аспектах городской жизни. История города в определенное время зависит от исторических личностей, способствовавших его экономическому, социокультурному и архитектурному расцвету (как их материальное отражение); расцвет городов в определенный период принес в наше время архитектурные шедевры, что делает их уникальными [3].

*Историко-культурный фактор* – формирующий (определяет, под влиянием каких культур формировалась существующая историческая городская архитектурная среда). Исторические города впитали в себя многонациональные культурные черты; объекты культурного наследия архитектуры и градостроительства, их стилистические особенности учитывают многонациональное влияние (историческая архитектурная среда города формировалась на основе сочетания региональных особенностей и трансформации лучших архитектурно-строительных достижений культур). Отличительной чертой архитектурных объектов культурного наследия является сочетание многонациональных архитектурных черт на одной небольшой территории [4].

*Национально-религиозный фактор* – формирующий и сохраняющий; прослеживается в архитектурных особенностях существующих городских доминант и их обычной среды. Так, в зависимости от религиозной принадлежности жителей в том или ином городе строились различные сакральные сооружения (храмы); стали городскими доминантами и определили особенности ряда зданий, которые формировались вокруг них. Как правило, это были жилые дома и коридоры, архитектура которых определялась образом жизни и менталитетом. Российские города всегда были многонациональными; их населяли русские, поляки, евреи, армяне, русские, татары, чехи и др. Жилые дома располагались отдельными кварталами, обычно рядом с храмом (церковью, мечетью или синагогой, в зависимости от вероисповедания). На центральной площади или торговой улице находились русские, украинские, польские, еврейские, армянские и другие жилые дома с магазинами и мастерскими, обычно на первом этаже. Русские города, особенно небольшие, характеризуются сочетанием разных религиозных приходов на небольшой территории со своими сакральными зданиями, которые до сих пор остаются городскими доминантами и центрами притяжения и формируют неповторимый силуэт каждого города. Нередко наблюдается расположение церквей разных конфессий рядом, даже на одной площади.

*Социально-экономический фактор* – формирующий и сохраняющий (социальная составляющая), изменяющийся (экономическая составляющая). В зависимости от того, кто населял тот или иной город по роду деятельности (купцы, ремесленники, земледельцы и т.д.), формировались особенности его развития; об этом свидетельствует и историческая топонимика города – исторические названия улиц, площадей и кварталов, сохранившиеся до наших дней; располагались объекты в определенных районах города в зависимости от деятельности жителей (например, в центре – торговая улица или квартал, ближе к реке – квартал кожевников или ткачей). Специфика ремесленной деятельности отразилась в архитектуре и декоре зданий, представляющих ныне объекты культурного наследия (кузнечные постройки обычно имели кованые детали декора; для кожевников характерен значительный уклон крыши и наличие слуховых окон на ней). Ярким примером трансформации городской площади в России является Дворцовая площадь в Санкт-Петербурге, претерпевшая значительные изменения на протяжении своей истории. Первоначально задумывалась как главная площадь столицы Российской империи, вокруг которой располагались наиболее важные государственные учреждения и дворцы (Зимний дворец, Генеральный штаб, Александровская колонна); площадь стала символом императорской мощи и величия. В советский период площадь приобрела новую функцию: на ней проходили парады, демонстрации и массовые мероприятия (отражение изменения идеологической направленности страны). Архитектурный ансамбль площади оставался нетронутым, однако её использование и значение изменились. В постсоветское время площадь является одной из главных туристических достопримечательностей; здесь проводятся культурные мероприятия, концерты и фестивали.

*Фактор времени и изменение коэффициента включения.* Для каждого временного периода характерны свои особенности; они нашли отражение в архитектуре и организации городского пространства; лучшие их образцы и составляют культурное наследие исторических объектов. Со временем произошли изменения в социальных практиках и, соответственно, в городском социокультурном пространстве; образовались определенные слои. Менее значимые «стирались» и заменялись более значимыми в определенный временной промежуток, остались наиболее ценные. Они переходили из одного временного периода в другой и дополнялись новыми чертами в зависимости от новых потребностей общественной жизни. Сегодня исторические центры малых городов представляют собой социально-пространственно-временные образования, в которых протекает современная городская жизнь [5]; их обновление – следствие обновления общества.

Архитектурно-градостроительный контекст каждого исторического города под влиянием вышеперечисленных факторов формировался, сохранялся и изменялся. Существующими планировочными и пространственными особенностями; городскими доминантами и их визуальной связью с природной и искусственной средой; иерархией, композицией и морфологией зданий; разбивкой кварталов и зданий; используемыми материалами; структурными, стилистическими, декоративными и колористическими особенностями определяется оригинальность исторического наследия. Очевидна необходимость *установления доминирующих факторов в формировании, сохранении и их изменения* для учета и активизации при выборе возможных исходных зон и сценариев дальнейшего развития каждого исторического города. Доминирующими являются природные, историко-культурные, национально-религиозные, социальные, экономические, а в последнее время – и информационно-технологические факторы.

Далее на основе исторического системно-структурного анализа [6...8] определяются особенности планирования и развития исторических архитектурных объектов города на разных временных этапах. Город следует рассматривать как целостную систему, состоящую из подсистем, которые, в свою очередь, представляют собой взаимосвязанные системы низшего порядка: улицы, площади, дворы, кварталы, ансамбли. Установлено, исчезновение существующих или появление новых внутренних связей между элементами в отдельной подсистеме влияет не только на их изменение и изменение этой подсистемы, но и на зависимость от них элементов из других подсистем и системы в целом [8]. Традиционно изменения указываются в схемах этапов развития исторического города и развития его архитектурных объектов культурного наследия. В том числе:

- организация городской застройки (выделение основных городских ансамблей и обычной городской среды; композиция зданий; морфология кварталов и пространств);
- визуальные связи доминант, акцентов и обычных зданий;
- городской силуэт;
- морфология, парцелляция, колорит исторических зданий (сохранившихся и не сохранившихся, но существующих в иконографиях);
- функциональные связи и центры тяжести.

При этом изменения и дополнения в градостроительстве; организация, композиция и морфология зданий, силуэт; доминанты, акценты и обычные здания, иерархия их связей; период наибольшего расцвета и развития исторического города и господствующего стиля определяются путем сравнения. Особенно это важно при принятии решения о воссоздании исчезнувших исторических доминант и стилизации возведенных новостроек при усилении или трансформации в историческом центре.

**Сравнительно-синтезирующий этап.** Здесь производится сопоставление данных, полученных на основе исторического системно-структурного анализа и отраженных в графических схемах разных периодов становления и развития архитектурных объектов культурного наследия. Для выявления историко-ценных элементов, сохранившихся до настоящего времени, проводятся полевые обследования и сопоставляются с данными графических схем аналитического этапа. К исторически ценным элементам и подсистемам относятся природные (ландшафты, рельеф, водоемы) и искусственно созданные (остатки оборонительных валов, стен, крепостей, территории исторических улиц, площади, кварталы, ансамбли, отдельные исторические здания). Выделяются доминирующие элементы (и подсистемы) и связи, которые на протяжении всей истории создания архитектурных

объектов культурного наследия определяли особенности городской среды, а сейчас оказывают решающее влияние на формирование исторического центра.

**Результирующий этап.** На предыдущем этапе композиционным методом устанавливались ценные и доминирующие элементы и подсистемы (естественные и искусственно созданные) и их связи, которые на протяжении всего периода своего существования имели решающее значение в формировании и развитии планировочной, объемно-пространственной, архитектурно-образной и функциональной структуры расположения архитектурных объектов культурного наследия, влияли и влияют в настоящее время на другие элементы общегородской системы (рис. 2). Они составляют «генетический код» города и определяют историческую и архитектурную ценность его архитектурных объектов культурного наследия, а потому должны сохраняться при любых реставрационных и реконструктивных преобразованиях.

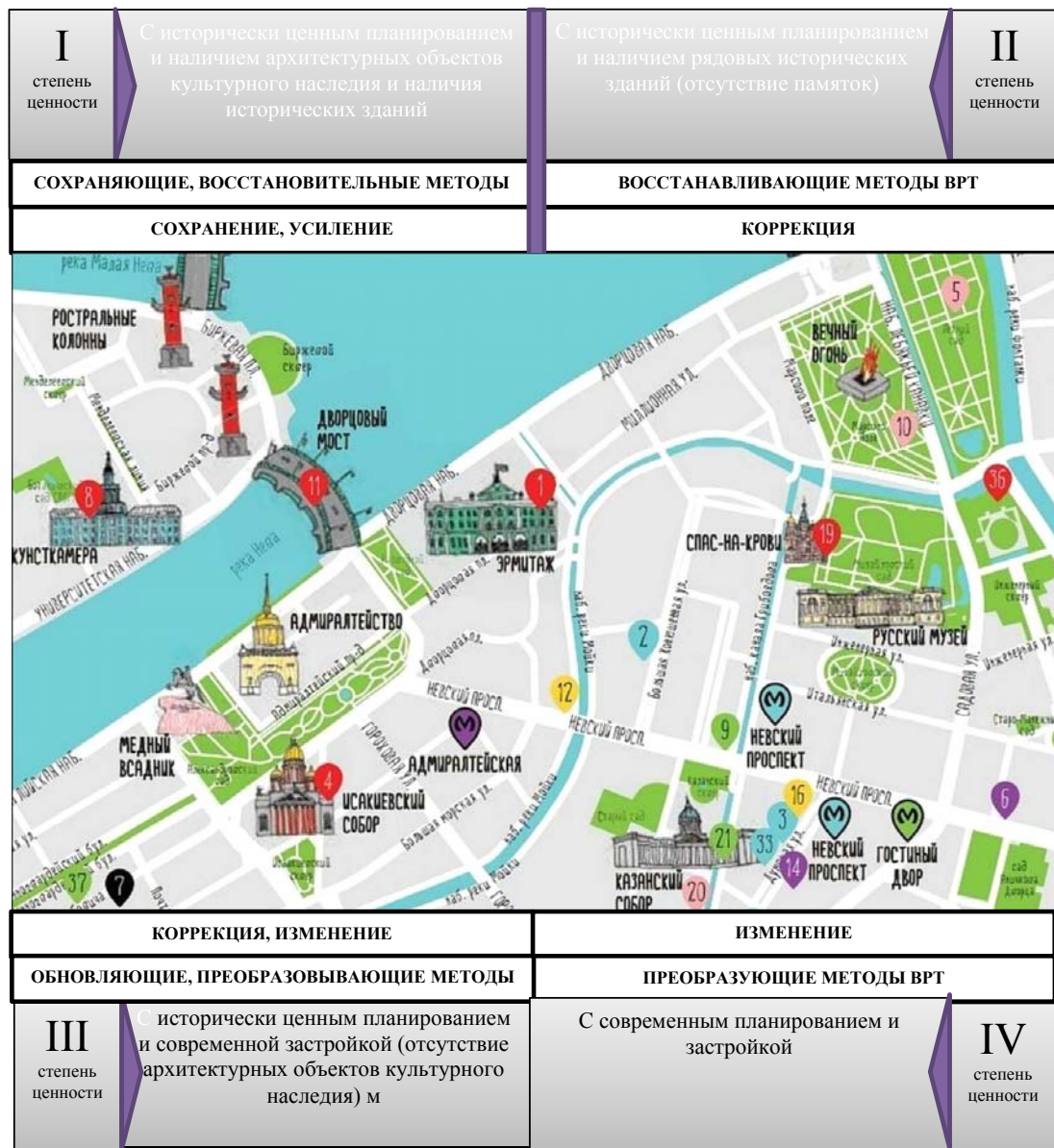


Рис. 2. Историко-генетическая схема. Степени ценности объектов архитектуры исторического центра

Рассматриваемая методика необходима для определения качественного показателя существующего состояния архитектурных объектов культурного наследия города –

его историко-архитектурной ценности. Перечислим степени ценности участков архитектурных объектов культурного наследия:

I степень – объекты с исторически ценной планировкой и наличием памятников различного значения и значимых исторических зданий;

II степень – участки с исторически ценной планировкой и наличием обычной исторической застройки (отсутствие памятников);

III степень – участки с исторически ценной планировкой и современной застройкой (отсутствие памятников, исторических построек на участке);

IV степень – участки с современной планировкой и застройкой.

Степень ценности участка определяет возможную степень реставрационно-реконструкционной трансформации и выбор возможных методов восстановительно-реконструктивной трансформации (I степень ценности – сохранение и приумножение с использованием консервационных и реставрационных методов ВРТ).

### **Выводы**

Введено понятие «восстановительно-реконструктивная трансформация» (ВРТ) и обосновано его применение при разработке методов реставрации объектов культурного наследия

Дана классификация (4 степени ценности) качественного показателя существующего состояния архитектурных объектов культурного наследия города.

Выявлены доминирующие факторы формирования, сохранения и изменения объектов культурного наследия.

### Список литературы

1. Крогиус, В.Р. Исторические города России как феномен ее культурного наследия / В.Р. Крогиус. – Москва: Прогресс-Традиция, 2009. – 312 с.

2. Синявина, Н.В. Городское пространство / город как объект исследования: историография вопроса / Н.В. Синявина // Вестник культурологии. – № 3 (98). – 2021. – С. 94–105.

3. Мирхасанов, Р.Ф. Композиционная форма в архитектуре конца XIX века: эволюция инженерной мысли / Р.Ф. Мирхасанов, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 2(55). – С. 157–161.

4. Попов, А.О. Системный подход к анализу технического состояния объектов культурного наследия на примере корпуса «ОРЕШЕК» Шлиссельбургской крепости / А.О. Попов, Л.Р. Маилян, Л.С. Сабитов, А.М. Данилов, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. 2023. – № 4 (57). – С. 199–205.

5. Есаулов, Г.В. Устойчивая архитектура – от принципов к стратегии развития / Г.В. Есаулов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 6. – С. 9–25.

6. Будылина, Е.А. Системный анализ как методология решения проблем / Е.А. Будылина, И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 2 (55). – С. 14–20.

7. Данилов, А.М. Методологическая парадигма естественных наук: системный подход / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 3 (28). – С. 161–165.

8. Лаврухин, А.Н. Фактор историко-культурного наследия в системе жизнедеятельности города / А.Н. Лаврухин // Инновации и инвестиции. – 2019. – № 5. – С. 178–181.

### References

1. Krogius, V.R. Historical cities of Russia as a phenomenon of its cultural heritage / V.R. Krogius. – Moscow: Progress-Tradition. 2009. – 312 p.

2. Sinyavina, N.V. Urban space / city as an object of research: historiography of the issue / N.V. Sinyavina // Bulletin of Cultural Studies. – № 3 (98). – 2021. – P. 94–105.

3. Mirkhasanov, R.F. Compositional form in the architecture of the late 19th century: the evolution of engineering thought / R.F. Mirkhasanov, L.S. Sabitov, I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2023. – № 2 (55). – P. 157–161.
4. Popov, A.O. A systems approach to the analysis of the technical condition of cultural heritage sites using the example of the ORESHEK building of the Shlisselburg Fortress / A.O. Popov, L.R. Mailyan, L.S. Sabitov, A.M. Danilov, I.N. Garkin // Regional architecture and engineering. – 2023. – № 4 (57). – P. 199–205.
5. Esaulov, G.V. Sustainable architecture – from principles to development strategy / G.V. Esaulov // Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. – 2014. – №6. – P. 9–25.
6. Budylnina, E.A. Systems analysis as a methodology for solving problems / E.A. Budylnina, I.A. Garkina, A.M. Danilov // Regional architecture and engineering. – 2023. – № 2 (55). – P. 14–20.
7. Danilov, A.M. Methodological paradigm of natural sciences: a systems approach / A.M. Danilov, I.A. Garkina // Regional architecture and engineering. – 2016. – № 3 (28). – P. 161–165.
8. Lavrukhin, A.N. The factor of historical and cultural heritage in the system of city life / A.N. Lavrukhin // Innovations and investments. – № 5. – 2019. – P. 178–181.



Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства

Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Береговой Александр Маркович,**  
доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник научно-  
исследовательского сектора  
E-mail: ambereg@rambler.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Beregovoy Aleksandr Marcovich,**  
Doctor of Sciences, Professor, Chief  
Researcher of the Research Sector  
E-mail: ambereg@rambler.ru

## ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ В ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ЗДАНИЯ

А.М. Береговой

На основе численного моделирования и натурного эксперимента дана оценка влиянию на тепловую эффективность зданий локальных критериев оптимальности в трех группах целевых функций единой энергетической системы здания, связанных с объемно-планировочным, архитектурно-конструктивным решением здания, теплоаккумулирующей способностью, теплоусвоением и энергоактивностью его конструкций. Определена приближенная величина компенсации теплотерь зданием при устройстве специальной теплоаккумулирующей конструкции после отключения системы отопления. Найдена амплитуда колебаний температуры поверхности наружных ограждений в условиях поступающего в помещение лучистого тепла солнечной радиации. Установлено, что в помещении с ограждениями, имеющими относительно большую тепловую инерцию, могут наблюдаться минимальные колебания температуры поверхности этих конструкций, обеспечивающие практически незаметные колебания температуры внутреннего воздуха в несколько долей градуса. Определена доля тепла солнечной радиации и верхнего слоя земли от тепловой нагрузки небольших зданий, имеющих упрощенный вариант плоского солнечного коллектора и вентилируемые бетонные каналы в конструкции пола подвального помещения.

*Ключевые слова: единая энергосистема здания, локальные критерии оптимальности, энергоэффективность, энергоактивность, блокирование зданий, тепло земли, тепло солнечной радиации, теплоаккумулирующая способность, теплоусвоение*

## FACTORS INFLUENCING ENERGY EFFICIENCY IN THE UNIFIED ENERGY SYSTEM OF THE BUILDING

A.M. Beregovoy

On the basis of numerical modeling and field experiment, an assessment of the influence of local optimality criteria is given on the thermal efficiency of buildings in three groups of target functions of the unified energy system of a building related to the spatial planning, architectural and constructive solution of the building, heat storage capacity, heat absorption and energy activity of its structures. The approximate value of compensation for heat loss by the building has been determined, when installing a special heat storage structure after switching off the heating system. The amplitude of fluctuations in the surface temperature of external enclosure structures under the conditions of the radiant heat of solar radiation entering the room is found. It is established, that in a room with enclosure structures, having relatively high thermal inertia, minimal fluctuations in the surface temperature of these structures can be observed, providing almost imperceptible fluctuations in the temperature of the internal air in several fractions of a degree. The proportion of heat from solar radiation and the upper layer of the earth from the thermal load of small buildings with a simplified version of a flat solar collector and ventilated concrete channels in the basement floor structure has been determined.

*Keywords: unified energy system of a building, local optimality criteria, energy efficiency, energy activity, blocking of buildings, heat of the earth, heat of solar radiation, heat storage capacity, heat absorption*

Разработка архитектурно-строительных решений энергоэффективных зданий позволяет рационально использовать топливно-энергетические ресурсы, предназначенные для отопления помещений, и обеспечивает формирование комфортного микроклимата внутренней воздушной среды. В дополнение к нормируемому методу проектирования таких зданий существует целый ряд подходов и способов по оценке и повышению их энергоэффективности, снижению тепловой потребности [1–3], а также представление о таком здании как о единой энергетической системе (ЕЭС).

В поставленной задаче исследования дается оценка влияния на тепловую эффективность зданий трех групп целевых функций ЕЭС и ее локальных критериев оптимальности (ЛКО), что позволяет улучшить выполнение следующих стадий проектирования с учетом проведенных автором исследований по усовершенствованию архитектурно-строительных решений таких зданий и использованию в них технических устройств:

1. Объемно-планировочные решения.

2. Архитектурно-конструктивные решения зданий и их теплоотдающих наружных ограждений.

3. Энергетическая активность зданий и их наружных ограждающих конструкций.

Целевая функция  $Z$  системы ЕЭС здания будет иметь вид

$$Z = f(Z_{\text{оп}}(k_1, \dots, k_n), \dots, Z_{\text{к}}(k_1, \dots, k_n), \dots, Z_{\text{за}}(k_1, \dots, k_n)), \quad (1)$$

где  $Z_{\text{оп}}$ ,  $Z_{\text{к}}$ ,  $Z_{\text{за}}$  – три группы целевых функций, связанных соответственно с объемно-планировочным, архитектурно-конструктивным решением здания и его энергоактивностью;  $k_1, \dots, k_n$  – локальные критерии оптимальности.

С учетом коэффициентов весомости  $\alpha_j$  каждую из групп целевых функций можно представить в следующем виде:

$$Z_{ec} = \sum_{j=1}^n g_j^{ec} \cdot k_j^{ec}. \quad (2)$$

В первой группе целевых функций среди локальных критериев, оценивающих ориентацию здания по сторонам горизонта, тепловое зонирование помещений, площадь оконных проемов по отношению к площади пола, тепловые «буферные зоны», ориентированные на солнечные стороны горизонта, а также атриумы рассматривались два критерия:

– критерий  $k_{\text{сф}}$ , оценивающий тепловое потребление здания за счет оптимизации его объемно-планировочного решения при использовании тепла солнечной радиации, передаваемого в помещения энергоактивной конструкцией, установленной на южном фасаде здания;

– критерий  $k_6$  по блокированию здания с другими объектами, что уменьшает коэффициент компактности формы и тепловое потребление здания благодаря снижению удельного расхода тепловой энергии.

Из второй группы критериев, оценивающих коэффициент теплопроводности материала, сопротивление воздухопроницанию и сопротивление паропроницанию наружного ограждения, исследовался критерий  $k_q$  по теплоаккумулирующей способности и теплоусвоению здания и его конструкций.

В третьей группе изучались критерии  $k_{\text{энс}}$  (тепло солнечной радиации) и  $k_{\text{тз}}$  (тепло верхнего массива земли).

При рассмотрении критерия  $k_{\text{сф}}$  проводился анализ зависимости ширины здания  $Ш$ ,  $m$ , и его этажности  $H_{\text{эт}}$ ,  $m$ , от отношения площади  $S_x$  энергоактивной конструкции (плоский солнечный коллектор) к суммарной полезной площади здания  $S_n$ , результаты которого показаны в табл.1 для случая, когда эта конструкция занимает всю площадь инсолируемого фасада. Увеличение этого отношения означает рост доли солнечного тепла от тепловой нагрузки здания на единицу его полезной площади.

Зависимость ширины здания и количества этажей от отношения  $S_x / S_n$

$H_{эт}, м$ \ Ш, м	10	12	14	16	18	20	22
3	0,33	0,28	0,24	0,20	0,16	0,13	0,11
6	0,62	0,50	0,43	0,38	0,34	0,31	0,28
9	0,92	0,80	0,70	0,61	0,53	0,46	0,40

По данным табл. 1, тепловое потребление такого энергоактивного здания снижается за счет роста доли солнечного тепла с уменьшением ширины и увеличением этажности здания. Анализ зависимости величины  $(S_o - S_x) / S_n$ , где  $S_o$  – общая площадь теплоотдающих конструкций здания, от количества этажей и площади энергоактивной конструкции  $S_x$  показал, что удельные тепловые потери снижаются с ростом числа этажей и увеличением  $S_x$ . Так, в 5-этажном энергоактивном здании по сравнению с обычным теплопотери через наружные ограждения могут быть снижены на 30 %, если  $S_x = 0,25 S_o$ .

Оценка влияния критерия  $k_6$  по эффективности блокирования была выполнена с использованием показателя  $i = \frac{S_{нп}^{бл}}{S_{нп}^{отд}}$ , который показывает отношение площади наружных ограждений в заблокированном здании к площади отдельно стоящих блокируемых объектов:

$$i = \frac{\sum S_{нп}^{отд} - \sum 2S_{нп}}{\sum S_{нп}^{отд}} = 1 - \frac{\sum 2S_{нп}}{\sum S_{нп}^{отд}}, \quad (3)$$

где  $2S_{нп}$  – удвоенная сумма площадей вновь образованных внутренних граней параллелепипеда.

Из результатов расчета видно, что при блокировании квадратных в плане зданий коэффициент эффективности блокирования может достигать 45 %, а, например, для трех зданий прямоугольной формы, блокируемых по продольным сторонам с размерами  $72,5 \times 18 \times 12$  (2 здания) и  $48,5 \times 12 \times 18$ , – 22,5 %.

В второй группе целевых функций механизм влияния критерия  $k_q$  исследовался путем расчетного моделирования с использованием следующих уравнений:

$$Bi = \alpha \cdot \delta / 2 \lambda \geq 100, \quad (4)$$

$$\frac{t - t_c}{t_o - t_c} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot [1 / (2n - 1)] \cos(2n - 1) \pi \cdot x / 2l \cdot \exp \left[ -(2n - 1)^2 \cdot \pi^2 \cdot F_o / 4 \right], \quad (5)$$

$$Q_{ак} = c_0 \cdot \rho \cdot V (t_o - t_{cp}), \quad (6)$$

$$\theta_{cp} = (t_{cp} - \tau_b) / (t_o - \tau_b) = (t_{cp} - 15) / (22 - 15), \quad (7)$$

$$F_o = 8,8 \cdot 10^{-4} \cdot 12 / 0,1^2 = 1,06, \quad (8)$$

$$F_o = \alpha \cdot z / (l + \lambda / \alpha)^2, \quad (9)$$

$$\alpha = 3,94 (v/x)^{0,5}. \quad (10)$$

Уравнения (4)–(10) дают приближенную оценку локальному критерию  $k_q$  по количеству теплоты, поступающей в помещение из теплоаккумулирующей конструкции в виде тонкой пластины при граничных условиях первого рода после отключения системы отопления. Критерий Био (уравнение (4)) описывает случай очень быстрого

движении вентиляционной струи вблизи поверхности пластины, когда сразу становятся равными температура окружающей воздушной среды  $t_b$  и температура  $\tau_b$  поверхности пластины толщиной  $\delta$  с коэффициентом теплопроводности материала  $\lambda$ .

По Лыкову А.В., в уравнении теплопроводности (5) для тонкой неограниченной пластины в случае равномерного распределения температур следующие показатели обозначают:  $t$ ,  $t_c$ ,  $t_0$  – соответственно температуры пластины, воздушной среды, начальная температура пластины;  $l$  – характерный размер пластины ( $l = \delta / 2$ );  $x$  – координата по толщине пластины;  $F_0 = \alpha \cdot z / l^2$  – критерий Фурье, где  $z$  – время, ч.

Уравнение (6) показывает количество теплоты  $Q_{ак}$ , кДж, отданной воздуху помещений теплоаккумулирующей конструкцией объемом  $V$ , м<sup>3</sup>, с удельной теплоемкостью материала  $c_0$ , кДж/(кг·°C), его плотностью  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, при начальной температуре конструкции  $t_0$ , °C, ее средней температуре  $t_{cp}$ , °C, в конце перерыва в работе системы отопления.

Величина  $t_{cp}$  была определена из уравнений (6) и (7), а величина  $\theta_{cp}$  по Богословскому В.Н. – из критерия Фурье  $F_0$  (уравнение (8)).

Если свести «краевую задачу» к «внутренней задаче» и принять для эквивалентного слоя конструкции линейное распределение температуры, а за характерный ее размер  $l + \lambda/\alpha$ , то критерий Фурье примет вид уравнения (9), из которого коэффициент конвективного теплообмена  $\alpha$  при обдуве поверхности воздухом может быть найден по формуле Богословского В.Н. (10), в которой  $v$  – скорость обдува конструкции вентиляционной струей.

Приближенную оценку компенсации теплопотерь зданием теплоаккумулирующей конструкцией при отключении его отопления можно дать, приняв определенные допущения. В расчете были приняты: перерыв в работе системы отопления здания с размерами в плане  $15 \times 15 \times 3$  м составляет  $z = 12$  ч, температура окружающей воздушной среды  $t_b$  и температура  $\tau_b$  поверхности пластины сразу становятся равными. Конечная температура помещения  $t_b = 15^\circ\text{C}$ , начальная температура конструкции  $t_0$  и температура воздуха помещения  $t_b$  до момента отключения отопления равны  $22^\circ\text{C}$ . Теплоаккумулирующая конструкция из тяжелого бетона плотностью  $2350 \text{ кг/м}^3$ , толщиной  $\delta = 0,2$  м, общей длиной  $5 \cdot 4 = 20$  м, высотой 3 м, объемом  $12 \text{ м}^3$  представляет собой внутреннее ограждение квадратной в плане комнаты и имеет признаки тонкой пластины, поскольку величина тепловой инерции половины ее толщины  $D < 1$ . Другие тепловыделения, как и влияющий на них тепломассоперенос через наружную оболочку, в расчете не учитывались. Наружное ограждение здания имеет нормативное сопротивление теплопередаче. Значение показателя  $v$  в формуле (8) равно  $5 \text{ м/с}$ .

Результаты расчета показали, что доля теплоты  $f_{ак}$ , выделяемой теплоаккумулирующей конструкцией в воздушную среду помещения за период отключения отопления, равный 12 ч, может составить около 20 % от того его количества  $F_{от}$ , которое могло бы поступить из системы отопления. Более высокую теплоотдачу с поверхности теплоаккумулирующей конструкции можно получить, увеличив скорость струи до  $v = 15 \text{ м/с}$ , что потребует значительно больших затрат энергии на создание такого обдува. Тогда эта доля может возрасти до 30 %.

Рассмотрение локального критерия  $k_q$  как показателя теплоусвоения ограждающих конструкций  $Y_{огр}$ , Вт/°C, позволило более точно оценить амплитуду колебаний температуры внутреннего воздуха  $A_t$ , °C, – важного фактора микроклимата помещений – с использованием следующих систем уравнений:

$$Y_{огр} = \sum Y_x \cdot F_x, \quad (11)$$

$$A_t = A_q / \sum Y_{огр} = A_q / \sum Y_x \cdot F_x, \quad (12)$$

$$Y_{огр} = Y_{огр} = Y_x \cdot F_x, \quad (13)$$

$$Y_{огр} = Y_{огр}^* + Y_{пер}. \quad (14)$$

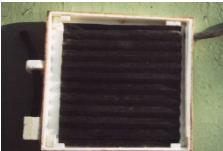
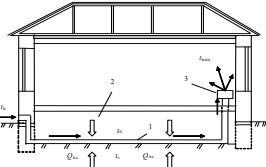
На основании показателя  $Y_{огр}$  была найдена величина колебаний температуры поверхностей наружных ограждений  $A_t$  в условиях поступающего в помещение лучистого тепла солнечной радиации с амплитудой  $A_q$ . В уравнении (14), учитывающем вариабельность плотности бетона  $\gamma_{пер}$ , кг/м<sup>3</sup>, ограждающей конструкции помещения в виде перегородок, показатель  $Y_{огр}^*$  обозначает теплоусвоение ограждений помещения без учета перегородок.

Результаты расчета показали, что в помещении с ограждениями, имеющими относительно большую тепловую инерцию ( $D$  от 2,3 до 6.6), в отличие от помещений с малотеплоинерционными ограждениями ( $D$  до 2,3 и  $\gamma=500$  кг/м<sup>3</sup>) наблюдаются сравнительно небольшие амплитуды температуры поверхности этих конструкций, достигающие минимальных значений в несколько долей градуса при плотности внутренних ограждающих конструкций 2400 кг/м<sup>3</sup> и поэтому обеспечивающие незначительные колебания температуры внутреннего воздуха.

Результаты проведенного натурного эксперимента по эффективности использования тепла солнечной радиации разработанной конструкцией плоского солнечного коллектора и численного моделирования по использованию тепла земли [4] позволили для третьей группы целевых функций дать оценку критериям  $k_{энс}$  и  $k_{тз}$ , определяющим долю тепла  $f$  этих возобновляемых источников энергии в тепловой нагрузке здания (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Эффективность конструктивного и технического решений по использованию возобновляемых источников энергии

 <p>Упрощенная конструкция солнечного коллектора</p>	<p>Доля тепла солнечной радиации от тепловой нагрузки здания</p> $f = 100 Q_T / L$ <p>Эффективность модуля коллектора</p> $\eta = Q_u / A \cdot I_T = F_R (\tau \cdot \alpha)_n - F_R \cdot U_L (T_{вх} - T_a) / I_T$ <p>Мощность модуля коллектора</p> $M_s = w c \rho (T_{вх} - T_{вх}) / 3600$	<p>Доля <math>f</math> в пределах до 12,5 % от тепловой нагрузки дома площадью 120 м<sup>2</sup> с 1 м<sup>2</sup> модуля для комнаты средней площади</p>
 <p>Вентилируемые бетонные каналы под полом подвала</p>	<p>Количество проходящего воздуха через канал сечением <math>\delta_x</math> и <math>\delta_y</math></p> $G_k = v_{вп} \cdot \rho_{вп} \cdot \delta_x \cdot \delta_y \cdot c$ <p>Количество тепла на подогрев воздуха в канале</p> $Q_n = c \cdot G_{под} (t_n - t_n)$	<p>Для небольшого дома с 8 каналами <math>\delta_x \times \delta_y = 10 \times 25</math> см. Доля тепла земли от тепловой нагрузки системы воздушного отопления <math>f = 26,3 \dots 39,5</math> %</p>

Максимальная мощность разработанного модуля плоского солнечного коллектора площадью 1 м<sup>2</sup> составила 0,673 кВт по результатам его натурных испытаний, проведенных в межсезонья при плотности потока солнечной радиации 640 Вт/м<sup>2</sup>. Расчет показал, что модули коллектора общей площадью 5 и 10 м<sup>2</sup>, установленные на южном фасаде здания, при таких условиях солнечной радиации могут передать в помещения соответственно 3,4 и 6,7 кВт тепловой энергии, что достаточно для эффективного отопления помещения площадью соответственно 34 и 67 м<sup>2</sup>.

Таким образом, оценка отдельных локальных критериев оптимальности как факторов влияния на единую энергетическую систему здания позволяет углубить представление по отдельным положениям нормативной методики проектирования энергоэффективного здания. Использование результатов данного исследования в проектной практике дает определенный выше эффект экономии тепловой энергии как для традиционного, так и для энергоактивного типа зданий.

1. Монастырев, П.В. Инструментальный метод определения показателей энергоэффективности многоквартирных жилых зданий / П.В. Монастырев, А.М. Макаров, А.С. Чех, О.И. Куцеко // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2020. – Т.4. – С. 42–56.
2. Бодров, М.В. Повышение энергоэффективности пассивных систем обеспечения параметров микроклимата в производственных помещениях / М.В. Бодров, А.А. Смыков, А.Ф. Юланова, А.Е. Руин // Приволжский научный журнал. – 2021. – № 4 (60). – С. 84–89.
3. Вытчиков, Ю.С. Уточненная методика расчета натопа в помещениях при прерывистом отоплении / Ю.С. Вытчиков, А.А. Чулков, В.А. Голиков // Градостроительство и архитектура. – 2021. – Т. 11, № 2 (43). – С. 9–14.
4. Береговой, А.М. Возобновляемые источники энергии и утилизация теплового потока помещений при регулировании воздухообмена / А.М. Береговой // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – №2. – С. 142–146.

## References

1. Monastyrev, P.V. An instrumental method for determining indicators of energy efficiency of multi-apartment residential buildings / P.V. Monastyrev, A.M. Makarov, A.S. Chekh, O.A. Kutseko // Izvestiya Southwestern State University. – 2020. – Vol.4. – P. 42–56.
2. Bodrov, M.V. Improving the energy efficiency of passive systems for providing microclimate parameters in industrial premises / M.V. Bodrov, A.A., Smykov, A.F. Yulanova, A.E. Ruin // Volga Scientific Journal. – 2021. – № 4 (60). – P. 84–89.
3. Vytchikov, Yu.S. A refined method for calculating the heating in the premises of a building with intermittent heating / Yu.S. Vytchikov, A.A. Chulkov, V.A. Golikov // Urban planning and architecture. – 2021. – Vol. 11, № 2 (43). – P. 9–14.
4. Beregovoy, A.M. Renewable energy sources and utilization of heat flow of rooms when regulating air exchange / A.M. Beregovoy // Regional architecture and engineering. – 2023. – № 2. – P. 142–146.

УДК 004: 69.01

DOI 10.54734/20722958\_2025\_1\_206

*Петрозаводский государственный университет**Petrozavodsk State University*Россия, 185910, г. Петрозаводск,  
пр. Ленина, д. 33Russia, 185910, Petrozavodsk,  
33, Lenin Avenue**Селютина Любовь Федоровна**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Технология  
и организация строительства»  
E-mail: selutinalf@mail.ru**Selutina Lyubov Feodorovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the Department «Technologies and  
Construction Management»  
E-mail: selutinalf@mail.ru**Бочарова Екатерина Сергеевна**,  
магистрант  
E-mail: katabocarova05623@gmail.com**Bocharova Ekaterina Sergeevna**,  
Master's student  
E-mail: katabocarova05623@gmail.com

## ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СКАТНОЙ КРЫШИ ОБЪЕКТА КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ В ПЕТРОЗАВОДСКЕ

Л.Ф. Селютина, Е.С. Бочарова

Приведены результаты работы отечественных исследователей по созданию моделей исторических зданий, а также обзор информации, предоставленной зарубежными авторами о развитии технологии информационного моделирования за период с 2009 г. Создана информационная модель стропильной системы бревенчатого жилого дома и библиотечные элементы крыши.

*Ключевые слова: объект культурного наследия, стропила, библиотечные элементы, цифровые технологии, информационная модель*

### INFORMATION MODELING OF THE PITCHED ROOF OF A CULTURAL HERITAGE OBJECT IN PETROZAVODSK

L.F. Selutina, E.S. Bocharova

The results of domestic researchers in creating historical buildings models and information of foreign authors about the development of information modeling from 2009 are given. An information model of a log apartment building and library roof elements have been created.

*Keywords: cultural heritage object, rafters, library elements, digital technologies, information model*

#### Введение

Значение культурного наследия в сохранении достижений прошлого времени, обычаев и ритуалов, оставшихся в памяти народов, в обеспечении преемственности поколений, а также в сохранении этнического самосознания невозможно переоценить.

В настоящее время для моделирования, управления и сохранения культурного наследия используется множество информационных технологий, включая компьютерную графику 3D, фотограмметрию, лазерное сканирование, геоинформационные системы (ГИС), онтологию и информационное моделирование зданий (BIM) [1].

В последние годы технологии информационного моделирования (ТИМ) находят применение при воссоздании, реставрации и сохранении объектов культурного наследия.

В исследованиях В.В. Талапова [2], Т.И. Козловой [3] описывается роль технологий информационного моделирования при работе с памятниками деревянной архитектуры. Данные исследования проводились при создании цифровых информационных моделей Зашиверской церкви, усадьбы Зарубина в деревне Ёдарма, а также храма Шенмудянь в Китае (2014 г.). Моделирование выполнялось в программном комплексе Autodesk Revit. Целями исследований было внедрение системы деревянного зодчества

в технологию BIM, создание задела для информационного моделирования с целью музеефикации, изучения и управления эксплуатацией памятников архитектуры, а также разработки библиотеки различных элементов из древесины.

Воссоздание утраченных памятников истории и архитектуры с применением информационной технологии моделирования приведено в статье Аникеевой С.О. [4]. Объектом виртуального воссоздания является дом с печкой (с. Паново, Кежемский район), входящий в комплекс ценных объектов, попадающих в зону затопления Богучанской ГЭС. Разработка информационной модели позволяет получить представление об утраченном объекте в целом и его элементах, быть основой для его воссоздания.

Опыт использования технологии BIM для музеефикации деревянных памятников архитектуры рассмотрен в работе [5].

В статье более позднего периода [6] приведены результаты российских исследователей по проблеме использования BIM-технологий в целях изучения воссоздания и музеефикации зданий. В работе рассматривается применение технологии информационного моделирования к объектам деревянного зодчества как к элементам геоинформационных систем.

Информационные модели скатных крыш гражданских зданий постройки середины XX в. в Карелии представлены в статье [7].

В последнее время в зарубежных странах появилась концепция комплексного моделирования «Heritage Building Information Modelling» (HBIM), обозначающая отдельную новую область исследований, которая позволяет понимать, документировать, транслировать и виртуально реконструировать архитектурное наследие. Ниже приведено развитие представлений зарубежных исследователей о методологии HBIM в хронологической последовательности по материалам, опубликованным с 2009 г.

Методология создания орфографических и 3D-моделей на основе лазерного сканирования и изображений рассмотрена в работе [8]. HBIM предлагается в качестве новой системы моделирования инженерных сооружений. Описаны 3 направления исследований: улучшение применения геометрического описательного языка для построения сложных параметрических систем; разработка параметрических материалов на основе исторических данных; определение промежуточных программных платформ для ускорения этого этапа HBIM. Целью данной статьи является подробное описание процедуры удаленного сбора данных с помощью лазерного сканирования и последующей обработки.

Термин «цифровое здание», используемый в статье [9], относится к полному набору информации, которая потенциально определяет все аспекты соответствующего реального здания, включая его цифровую инфраструктуру. Такое цифровое здание, которое может быть представлено по мере необходимости в виде полностью идентифицированного виртуального здания, должно отражать жизненный цикл соответствующего реального здания. В работе дано определение развития понятия цифровых зданий как для поддержки жизненного цикла отдельных зданий, так и для того, чтобы играть все возрастающую роль в более широком функционировании самой отрасли.

Рассмотрены перспективы обновления системы для создания подробной готовой модели, включающей любые отклонения модели на этапе проектирования и эксплуатации, а также добавления дополнительной информации [9]. Авторы предполагают, что в результате работа будет вестись непосредственно с моделью (а не с предварительно разработанными чертежами этой модели), сотрудники подрядчика получают такую же степень взаимодействия с моделью, которая в настоящее время доступна проектировщикам.

Результаты первого этапа исследования моделирования и анализа предлагаемого рабочего процесса от лазерного сканирования, HBIM до CityGML представлены в [10]. Рабочий процесс предоставляет новые инструменты и методы для моделирования 3D-виртуального наследия, документирования, управления и анализа. Использование лазерного сканирования и фотограмметрии позволяет получать достаточно точно проработанную цифровую модель здания, включая территорию, на которой расположен объект. Процесс HBIM позволяет автоматизировать и ускорить этап моделирования за счет использования точных параметрических объектов и методов проце-



дурного моделирования. В результате НВМ могут быть созданы автоматизированные документы по сохранению: планы, разрез и рельеф местности. Интеграция с CityGML может предоставить дополнительные возможности для привязки 3D-модели наследия к информационным системам. Модель CityGML может быть интегрирована в ГИС-платформы для эффективного управления и анализа, которые необходимы для поддержания объектов культурного наследия.

Распространение ВМ на архитектурное наследие открывает новые возможности, расширяя направления исследований, которые предоставляют приложения для обследования, моделирования и реставрации исторических зданий [11].

Методы ВМ представляют в области архитектурного наследия некоторые ограничения, которые препятствовали эффективному использованию [12, 14]. Одним из ограничений ВМ в области архитектурного наследия является отсутствие параметрических библиотечных объектов в программном обеспечении ВМ, которое можно было бы использовать для исторических зданий. Кроме того, ВМ как инструмент нового проектирования, как правило, не способен моделировать неидеальные состояния, такие как отклонения, повреждения и износ [14].

Развитие методологии содержания архитектурного наследия рассматривается в статье [13]. Авторы предлагают направление, при реализации которого возможна разработка проекта реставрации, технического обслуживания и управления архитектурным объектом. Такие проекты должны учитывать уникальность исторических зданий, процессы модификации и трансформации, происходящие в течение эксплуатации здания, явления деградации и деформации. Подход ВМ, разработанный для проектов новых зданий, отличается от подхода к воссозданию виртуальной модели архитектурного наследия.

Технологии 3D-сканирования и фотограмметрии особенно актуальны для ускорения сбора пространственных данных из существующих зданий, а также для быстрого вмешательства в опасных условиях эксплуатации [14].

По этой причине виртуальная и детальная реконструкция культурно-исторического наследия выявила некоторые ограничения платформ ВМ, такие как отсутствие базы библиотек исторических параметрических элементов и отсутствие инструментов для управления сложными, неправильными и неопределенными формами.

Отсутствие международных библиотек НВМ, разница между различными архитектурными периодами и их многообразие, недостаточное международное сотрудничество ограничили потенциальное использование НВМ. В то же время современные подходы демонстрируют, что сочетание инструментов ВМ с инструментами ГИС и вспомогательным программным обеспечением является эффективным решением для управления и моделирования графических (облака точек) и семантических (историко-конструктивная информация) данных полуавтоматическим способом.

НВМ может использоваться для извлечения данных из наследия и разработки текущих метрических данных для точного моделирования исторических структур в целях реконструкции, сохранения и исследования [15]. НВМ представляет собой инструмент для управления и документирования объектов культурного наследия как для их повседневной эксплуатации, так и для планирования сохранения и приспособления к современному использованию.

НВМ можно использовать для отслеживания процесса старения построенного объекта с учетом таких факторов, как деформации конструкций, ремонт и восстановление.

#### **Материалы и методы**

В данной статье представлено продолжение выполненной ранее работы «Бревенчатый жилой дом в Петрозаводске – объект культурного наследия: история и методология исследования». (Статья подготовлена к печати в журнале «Региональная архитектура и строительство».)

В настоящей статье при разработке информационной модели скатной крыши объекта культурного наследия в Петрозаводске (рис. 1) и библиотечных элементов крыши использовались данные мониторинга, исследований, выполненных ранее.



Рис. 1. Южный фасад жилого дома, объекта культурного наследия (апрель 2024 г.)

Для создания информационных моделей использовались программы: Graphisoft Archicad (помимо инструментов в программе использовался определенный набор библиотек: Archicad Library 26, CI Tools Library 26 и атрибутов, таких как материал конструкции); Autodesk AutoCAD Architecture, Model Studio CS Строительные решения и CADlib Модель и Архив (Российское программное обеспечение). Использовались публикации отечественных и зарубежных исследователей. Применялись теоретические методы исследования: анализ, синтез, аналогия.

### Результаты

План стропил и план подстропильных бревен представлены на рис. 2, 3.

Фрагмент визуализации информационной модели стропильной системы представлен на рис. 4.

Информационная модель крыши жилого дома показана на рис. 5.

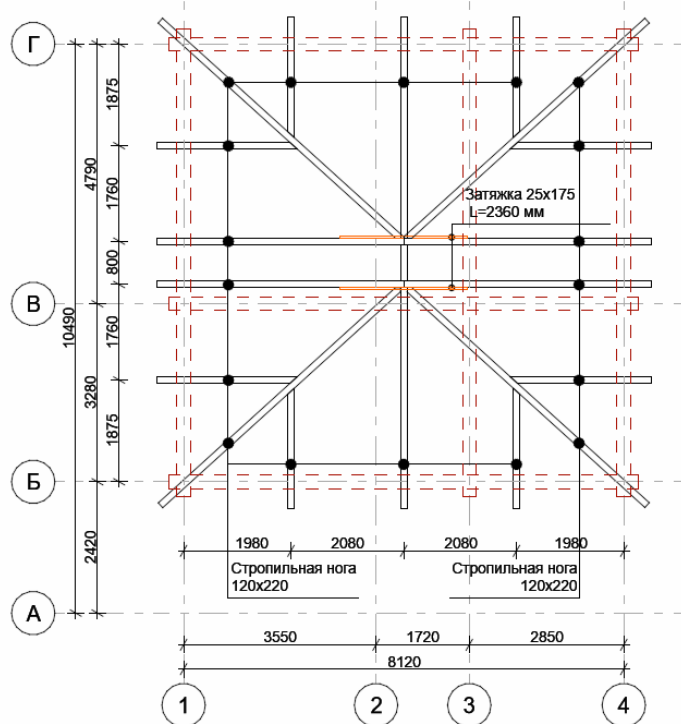


Рис. 2. План стропил

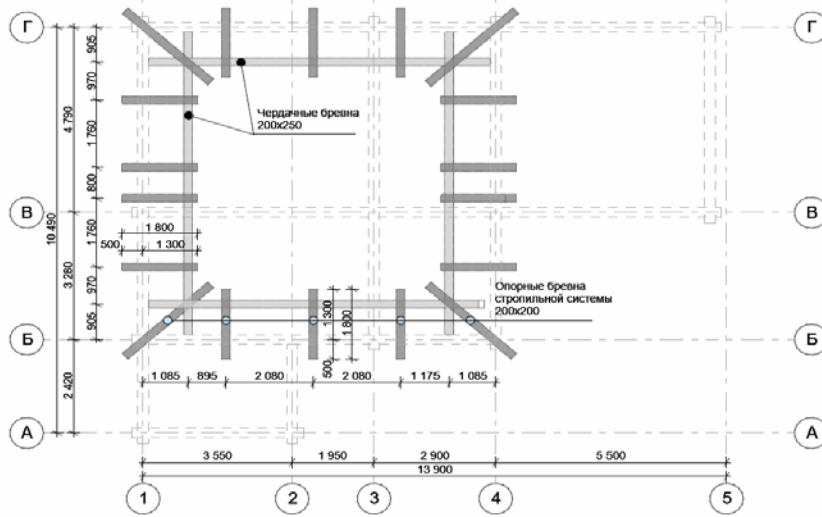


Рис. 3. План подстропильных бревен

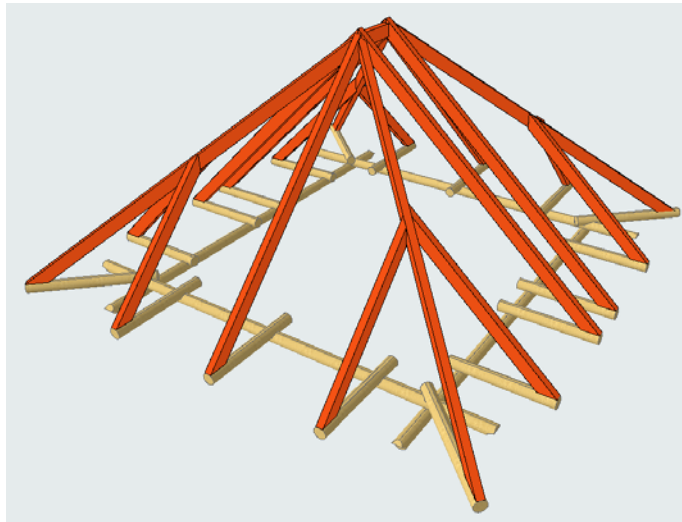


Рис. 4. Фрагмент визуализации информационной модели стропильной системы

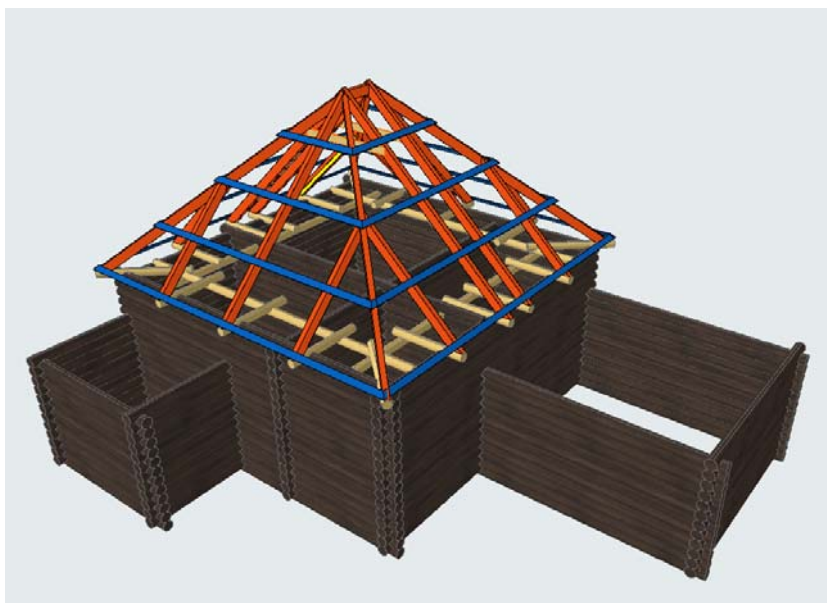


Рис. 5. Информационная модель крыши жилого дома

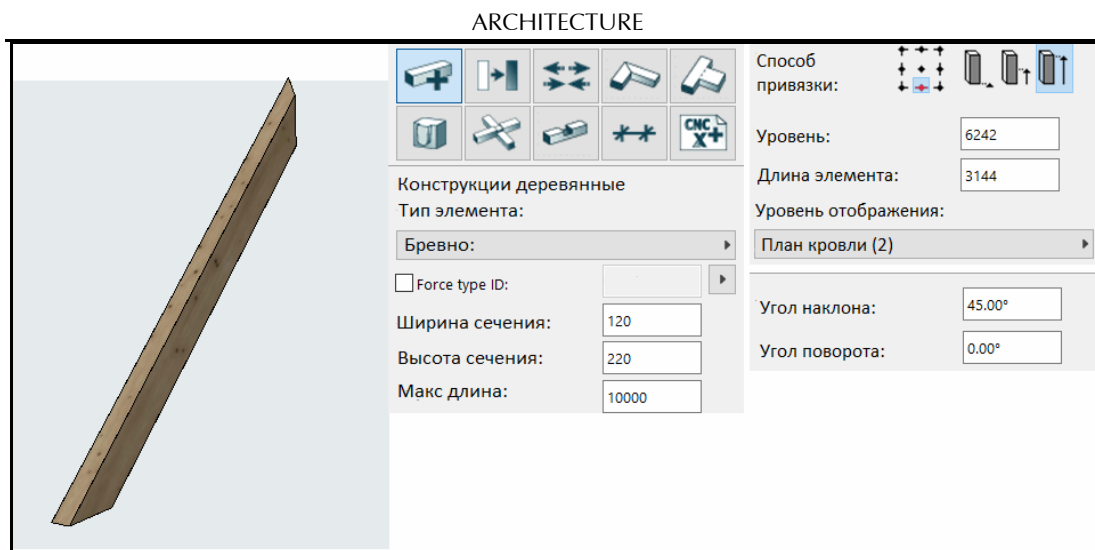


Рис. 6. Атрибуты: стропильная нога

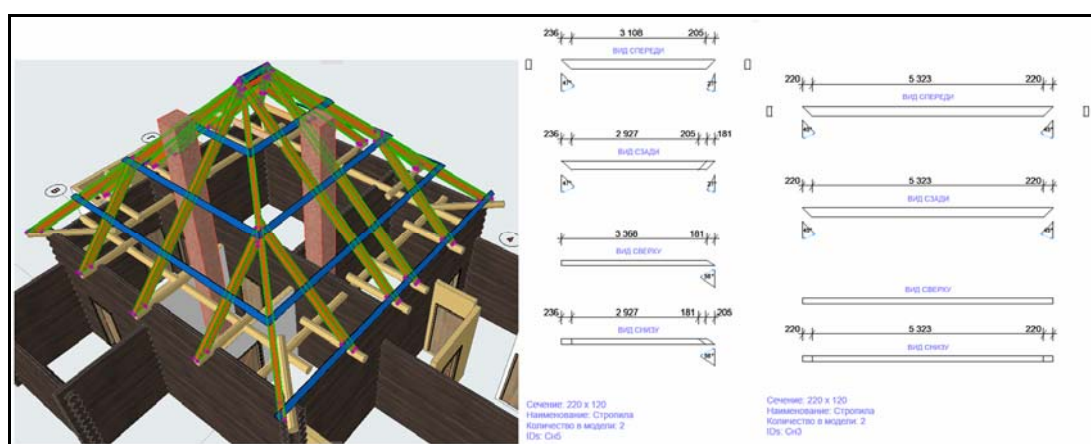


Рис. 7. Атрибуты: стропильная система

### Обсуждение

Обзор публикаций о развитии технологии информационного моделирования за период с 2009 г. показал, что исследования и разработки по направлению HBIM (Historic building information modelling) являются актуальными в ряде стран [1–17]. Однако ограничением BIM в области архитектурного наследия являются отсутствие параметрических библиотечных элементов в программном обеспечении BIM, ограниченность базы по деревянным конструкциям в целом, которые можно было бы использовать для исторических зданий, и отсутствие инструментов для управления сложными и неопределенными формами, получаемыми из облаков точек исторических объектов регионального архитектурного наследия. Тем не менее использование опыта обследований исторических зданий [7, 16, 17], адаптация новых методик в данной области исследований [1–5, 8–15] с учетом региональных особенностей традиционного строительства и архитектуры создают необходимые и достаточные условия для прогресса в информационном моделировании исторических зданий (HBIM).

### Заключение

Информационное моделирование исторических зданий (HBIM) с учетом особенностей региональной архитектуры и строительства является одним из наиболее эффективных способов сохранения культурного наследия. Из всего многообразия соответствующих объектов в данной работе представлена информационная модель стропильной системы и библиотечные элементы крыши жилого дома, который является объектом культурного наследия в Петрозаводске.

Для создания информационных моделей использовались программы: Graphisoft Archicad (помимо инструментов в программе использовался определенный набор

библиотек: Archicad Library 26, CI Tools Library 26 и атрибутов, таких как материал конструкции); Autodesk AutoCAD Architecture, Model Studio CS Строительные решения и CADlib Модель и Архив (Российское программное обеспечение).

Интеграция существующих методов в области моделирования позволяет расширить возможности HBIM в области документирования наследия, управления и сохранения.

Технологии информационного моделирования позволяют сохранить и воссоздать исторические объекты. Данные исследования могут быть использованы в работе специалистов по реставрации, цифровизации и консервации исторических объектов. Использование возможностей технологии информационного моделирования в архитектурном и инженерном образовании позволяет повысить качество подготовки специалистов для строительной отрасли с учетом особенностей региональной архитектуры и строительства.

#### Список литературы

1. Yang, X. Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information techniques / X. Yang, P. Grussenmeyer, M. Koehl, H. Macher, A. Murtiyoso, T. Lande. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/342929270>.

2. Талапов, В.В. Технология BIM в России: Зашиверская церковь / В.В. Талапов, Т.И. Козлова // CADmaster. – 2011. – № 6 (61). – С. 90–95.

3. Козлова, Т.И. BIM и памятники деревянной архитектуры / Т.И. Козлова, С.О. Куликова, В.В. Талапов, Ч. Гуаньин // Историческая информатика. Информационные технологии и математические методы в исторических исследованиях и образовании. – 2014. – № 2–3 (8–9). – С. 50–73.

4. Анিকেева, С.О. Воссоздание утраченных памятников истории и архитектуры с помощью технологии BIM (на примере дома с печкой, с. Паново, Красноярский край) / С.О. Анিকেева // Вестник Томского государственного университета. История. – 2013. – № 3(23). – С. 7–9. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vossozdanie-utrachennyh-pamyatnikov-istorii-i-arhitektury-s-pomoschyu-tehnologii-bim-na-primere-doma-s-pechkoys-panovo-krasnoyarskiy-kray>.

5. Анিকেева, С.О. Об опыте использования технологии BIM для музеефикации деревянных памятников архитектуры / С.О. Анিকেева // Вестник Томского государственного университета. Культурология и искусствоведение. – 2014. – № 1(13). – С. 31–36. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-opyte-ispolzovaniya-tehnologii-bim-dlya-muzeefikatsii-derevyannyh-pamyatnikov-arhitektury>.

6. Ермолаева, Е.И. Опыт применения технологии BIM в изучении, воссоздании и музеефикации зданий и сооружений России / Е.И. Ермолаева, А. Ю. Майничева. – DOI 10.24411/9999-00^2020-10051 // Баландинские чтения. Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств. Институт археологии и этнографии СО РАН. – 2020. – Т. 15. – С.460–470. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44710225>.

7. Бочарова, Е.С. Информационное моделирование стропильных систем зданий постройки середины XX века / Е.С. Бочарова, Л.Ф. Селютина. – DOI 10.54734/20722958\_2023\_3\_128 // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – №3. – С. 128–134.

8. Murphy, M. Historic building information modelling (HBIM) / M. Murphy, E. McGovern, S. Pavia. – DOI: 10.1108/02630800919985108// Structural Survey. – 2009. – Vol. 27, № 4. – P. 311–327.

9. Watson, A. Digital buildings – Challenges and opportunities/ A. Watson // Advanced Engineering Informatics. – 2011. – Vol. 25, №4. – P. 573–581. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.07.003>.

10. Dor, C. Integration of HBIM and 3D GIS for Digital Heritage Modeling / Conor Dor, Maurice Murphy //Dublin Institute of Technology. – URL: [https://www.academia.edu/2099497/Integration\\_of\\_HBIM\\_and\\_3D\\_GIS\\_for\\_Digital\\_Heritage\\_Modelling](https://www.academia.edu/2099497/Integration_of_HBIM_and_3D_GIS_for_Digital_Heritage_Modelling)

11. Brusaporci, S. Re-loading BIM between spatial and database information modeling for architectural heritage documentation / S. Brusaporci, P. Maiezza //Conference:

XIII congreso intertrrtional expression Grafica aplicado a la edificacion. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/311678865>.

12. Apolonio, F.I. A reality integrated BIM for architectural heritage conservation/ F. Apolonio, N. Falanni, Z. Sun. – DOI 10.4018/978-1-5225-0675-1.ch002 // Handbook In research on emerging, technologies for architectures and archaeological heritage. Journal of civil engineering and management. – 2016.– Vol. 22 (6). – P. 32–33.

13. Brusaporci, B.A. Framework for architectural heritage HBIM semantizaition and development / B.A. Brusaporci, P. Maiezza, A.Tata. – DOI 10.5194/isprs-archives-XLII-2-179 // The international archives of the photogrammetry, remote, sensing and spatial information sciebces. – Vol. XLII – 2.2018.

14. López, F.J. A Review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM) / F.J. López, P.M. Leronés, J. Llamas, J. Gómez-García-Bermejo, E. Zalama. – DOI 10.3390/mti2020021 // Multimodal Technologies and Interact. – 2018. – № 2.

15. Liu, J. An introduction to technological tools and process of heritage building information modeling (HBIM) / J. Liu, D.S. Willkens, G. Foreman. – ISSN 2605-082X // EGE – Revista de Expresión Gráfica en la Edificación. – 2022. – №16. – URL: <https://doi.org/10.4995/ege.2022.17723>.

16. Селютина, Л.Ф. Деревянные конструкции здания постройки 1914 года в поселке Эссойла / Л.Ф. Селютина // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – №1 (42). – С.104–112.

17. Selutina, L. Wooden roof of the Moberg house / L.F. Selutina, E.I. Ratkova, E. Okulova. – Doi.org/10.1051/e3sconf/202337603007// E3S Web of conference 376, 03007 (2023).

#### References

1. Yang, X. Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information techniques / X. Yang, P. Grussenmeyer, M. Koehl, H. Macher, A. Murtiyoso, T. Lande. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/342929270>.

2. Talapov, V.V. BIM technology in Russia: Zashiverskaya Church / V.V. Talapov, T.I. Kozlova// CADmaster. – 2011. – № 6 (61). – P. 90–95.

3. Kozlova, T.I. BIM and monuments of wooden architecture / T.I. Kozlova, S.O. Kulikova, V.V. Talapov, Ch. Guanyin // Historical Informatics. Information technologies and mathematical methods in historical research and education. – 2014. – № 2–3(8–9). – P. 50–73.

4. Anikeeva, S.O. On the experience of using BIM technology for museification of wooden architectural monuments /S.O. Anikeeva // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Kul'turologija i iskusstvovedenie. – 2014. – No. 1(13). – P. 31–36. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vossozdanie-utrachennyh-pamyatnikov-istorii-i-arhitektury-s-pomoschyu-tehnologii-bim-na-primere-doma-s-pechkoy-s-panovo-krasnoyarskiy-kray>.

5. Anikeeva, S.O. Reconstruction of lost historical and architectural monuments using BIM technology (on the example of a house with a stove, Panovo village, Krasnoyarsk Territory) / S.O. Anikeeva // Bulletin of Tomsk State University. History. – 2013. – № 3(23). – P. 7–9.

6. Ermolaeva, E.I. The experience of using BIM technology in the study, reconstruction and museification of buildings and structures in Russia/ E.I. Ermolaeva, A.Y. Mainicheva. // Balandin readings. Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts. Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS. – 2020. – Vol. 15. – P. 460–470. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44710225>. DOI: 10.24411/9999-00–2020–10051.

7. Bocharova, E.S. Information modeling of rafter systems of building constructed in the middle of the twentieth century/ E.S. Bocharova, L.F. Selutina. – DOI 10.54734/20722958-2023-3-128 // Regional architecture and engineering. – 2023. – №3. – P. 128–135.

8. Murphy, M. Historic building information modelling (HBIM) / M. Murphy, E. McGovern, S. Pavia. – DOI: 10.1108/02630800919985108// Structural Survey. – 2009. – Vol. 27, № 4. – P. 311–327.

9. Watson, A. Digital buildings – Challenges and opportunities/ A. Watson // *Advanced Engineering Informatics*. – 2011. – Vol. 25, №4. – P. 573–581. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.07.003>.
10. Dor, C. Integration of HBIM and 3D GIS for Digital Heritage Modeling / Conor Dor, Maurice Murphy // *Dublin Institute of Technology*. – URL: [https://www.academia.edu/2099497/Integration\\_of\\_HBIM\\_and\\_3D\\_GIS\\_for\\_Digital\\_Heritage\\_Modelling](https://www.academia.edu/2099497/Integration_of_HBIM_and_3D_GIS_for_Digital_Heritage_Modelling)
11. Brusaporci, S. Re-loading BIM between spatial and database information modeling for architectural heritage documentation / S. Brusaporci, P. Maiezza // *Conference: XIII congreso intertrritional expression Grafica aplicado a la edificacion*. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/311678865>.
12. Apolonio, F.I. A reality integrated BIM for architectural heritage conservation/ F. Apolonio, N. Falanni, Z. Sun. – DOI 10.4018/978-1-5225-0675-1.ch002 // *Handbook In research on emerging, technologies for architectures and archaeological heritage. Journal of civil engineering and management*. – 2016. – Vol. 22 (6). – P. 32–33.
13. Brusaporci, B.A. Framework for architectural heritage HBIM semantizaition and development / B.A. Brusaporci, P. Maiezza, A. Tata. – DOI 10.5194/isprs-archives-XLII-2-179 // *The international archives of the photogrammetry, remote, sensing and spatial information sciebces*. – Vol. XLII – 2.2018.
14. López, F.J. A Review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM) / F.J. López, P.M. Leronés, J. Llamas, J. Gómez-García-Bermejo, E. Zalama. – DOI 10.3390/mti2020021 // *Multimodal Technologies and Interact*. – 2018. – № 2.
15. Liu, J. An introduction to technological tools and process of heritage building information modeling (HBIM) / J. Liu, D.S. Willkens, G. Foreman. – ISSN 2605-082X // *EGE – Revista de Expresión Gráfica en la Edificación*. – 2022. – N° 16. – URL: <https://doi.org/10.4995/ege.2022.17723>.
16. Selutina, L.F. Wooden structures of the building built in 1914 in the village of Essoila / L.F. Selutina // *Regional architectural and engineering*. – 2010– №1 (42). – P.104–112.
17. Selutina, L. Wooden roof of the Moberg house / L.F. Selutina, E.I. Ratkova, E. Okulova. – [Doi.org/10.1051/e3sconf/202337603007](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337603007) // *E3S Web of conference 376, 03007 (2023)*.

УДК 534.2

DOI 10.54734/20722958\_2025\_1\_215

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Гречишкин Александр Викторович**,  
кандидат технических наук,  
зав. кафедрой «Городское строительство  
и архитектура»  
E-mail: gsia@pguas.ru

*Научно-исследовательский институт  
строительной физики РААСН*

Россия, 127238, г. Москва,  
Локомотивный проезд, д. 21,  
тел.: 8 (495) 482-40-76

**Антонов Александр Иванович**,  
доктор технических наук, доцент, ведущий  
научный сотрудник НИИСФ РААСН  
E-mail: aiant58@yandex.ru

**Гусев Владимир Петрович**,  
доктор технических наук, с.н.с.,  
главный научный сотрудник НИИСФ  
РААСН  
E-mail: niisf@mail.ru

*Тамбовский государственный технический  
университет*

Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д.106,  
тел.: (84752) 63-09-20;

**Жоголева Ольга Александровна**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Городское строительство  
и автомобильные дороги»  
E-mail: zhogoleva.olga@rambler.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Grechishkin Aleksander Viktorovich**,  
Candidate of Sciences, Head of the  
department «Urban Development and  
Architecture»  
E-mail: gsia@pguas.ru

*Scientific-Research Institute of Building  
Physics of RAASN*

Russia, 127238, Moscow,  
21, Lokomotivniy Driveway,  
tel.: 8 (495) 482-40-76

**Antonov Aleksander Ivanovich**,  
Doctor of Sciences, Associate Professor,  
Leading Researcher at the Scientific-Research  
Institute of Building Physics of RAASN  
E-mail: aiant58@yandex.ru

**Gusev Vladimir Petrovich**,  
Doctor of Sciences, Senior Researcher,  
Chief Researcher of the Scientific-Research  
Institute of Building Physics of RAASN  
E-mail: niisf@mail.ru

*Tambov State Technical University*

Russia, 392000, Tambov, 106, Sovetskaya St.,  
tel.: (84752) 63-09-20;

**Zhogoleva Olga Aleksandrovna**,  
Candidate of Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of the department «Urban  
development and roads»  
E-mail: zhogoleva.olga@rambler.ru

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАЗОРОВ МЕЖДУ АКУСТИЧЕСКИМИ ЭКРАНАМИ И ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКРАНИРОВАНИЯ ШУМА

А.В. Гречишкин, А.И. Антонов, В.П. Гусев, О.А. Жоголева

Эффективность акустических экранов, размещаемых в городской застройке, существенно зависит от наличия зазоров между экранами и опорной поверхностью, над которой они располагаются. Снижение эффективности экранирования из-за наличия зазоров в настоящее время определяется экспериментально. Для оценки на стадии проектирования экранов снижения эффективности экранирования из-за зазоров предложено использовать численный метод реализации дифракционного уравнения Френеля – Кирхгофа. Разработана методика расчета и на ее основе показана возможность решения практических задач, связанных с оценкой влияния зазоров на акустическую эффективность экранов. Методика может быть использована на ранних стадиях проектирования шумозащитных мероприятий.

*Ключевые слова:* акустические экраны, оценка эффективности, проектирование, городская застройка, методика расчета



## EVALUATION OF THE EFFECT OF GAPS BETWEEN ACOUSTIC SCREENS AND THE SUPPORT SURFACE ON THE EFFECTIVENESS OF NOISE SHIELDING

A.V. Grechishkin, A.I. Antonov, V.P. Gusev, O.A. Zhogoleva

The effectiveness of acoustic screens located in urban areas significantly depends on the presence of gaps between the screens and the support surface above which they are located. The decrease in shielding efficiency due to the presence of gaps is currently determined experimentally. To evaluate the decrease in screening efficiency due to gaps at the design stage of screens, it is proposed to use a numerical method for implementing the Fresnel-Kirchhoff diffraction equation. A calculation method is proposed and based on it, the solution of practical problems related to assessing the effect of gaps on the acoustic efficiency of cranes is shown. The technique can be used at the early stages of designing noise protection measures.

*Keywords: acoustic screens, efficiency assessment, design, urban development, calculation method*

Традиционно акустические экраны используются для снижения шума в городской застройке при действии в ней различных источников шума [1–3]. Существующая практика применения экранов показала, что их акустическая эффективность существенно зависит от большого количества факторов, которые необходимо учитывать при проектировании [4]. Одним из таких факторов является наличие зазоров между акустическим экраном и опорной поверхностью, на которой размещается экран. Необходимость устройства зазоров связана с различными технологическими требованиями (уборка снега на крышах и эстакадах, обеспечение проветривания и т.д.).

Установлено [4], что наличие зазоров (щелей) между экраном и опорной поверхностью приводит к снижению эффективности экранирования на 8 дБ. В настоящее время отсутствует расчетная методика оценки влияния зазоров на эффективность экранирования, поэтому данные о снижении эффективности экранирования определяются экспериментально для ограниченного круга ситуаций. При этом наблюдаются противоречивые результаты. Установлено, что акустическая эффективность экранов зависит от размеров зазора и может различаться на разных частотах, а также может быть разной при их разном расположении по отношению к защищаемому объекту.

Эффективность экранирования по Борну М. оценивается путем решения дифракционного уравнения Френеля – Кирхгофа:

$$P_M = \frac{\hat{P}}{2\lambda} \int_S \frac{\sin(\omega t - (r_T + r_M)k + \varphi)}{r_T \cdot r_M} (\cos \theta_T + \cos \theta_M) dS, \quad (1)$$

где  $\hat{P}$  – максимальное мгновенное звуковое давление (амплитуда) на расстоянии единицы длины от источника  $T$ ;  $\lambda$  – длина звуковой волны;  $S$  – площадь фронта звуковой волны;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота;  $f$  – частота звука;  $k = \omega/c$  – волновое число;  $c$  – скорость звука в воздухе;  $t$  – время;  $r_T, r_M$  – расстояния от участка фронта волны  $ds$  до источника звука  $T$  и расчетной точки  $M$ ;  $\theta_T, \theta_M$  – углы между нормалью к элементу поверхности  $ds$  и направлениями на точки  $T$  и  $M$ ;  $\varphi$  – начальная фаза звукового колебания.

В [5] представлены разработанные численный метод и компьютерная программа решения уравнения (1), показана принципиальная возможность использования их для решения практических задач, и в частности для оценки влияния зазоров на эффективность экранирования. Оценка точности предложенного метода выполнена путем сравнения полученных результатов с экспериментальными данными, приведенными в [6].

В настоящей статье представлены результаты исследования влияния зазоров на эффективность экранирования с учетом их размеров и положения расчетной точки относительно зазора экрана. Расчеты шума выполнялись комбинированным методом. Определение звуковой энергии, дифрагированной через верхнюю кромку экрана, производилось методом Маекава [6], а звуковой энергии, проникающей через зазор, – численным методом решения уравнения (1) [5]. Конечный результат определялся энергетическим суммированием полученных данных.

Ниже приведены результаты расчетов и дан анализ влияния зазоров на эффективность экранов. Оценка влияния зазоров на эффективность экранирования с использованием предложенной расчетной методики рассмотрена на примере реальной городской ситуации (рис. 1).

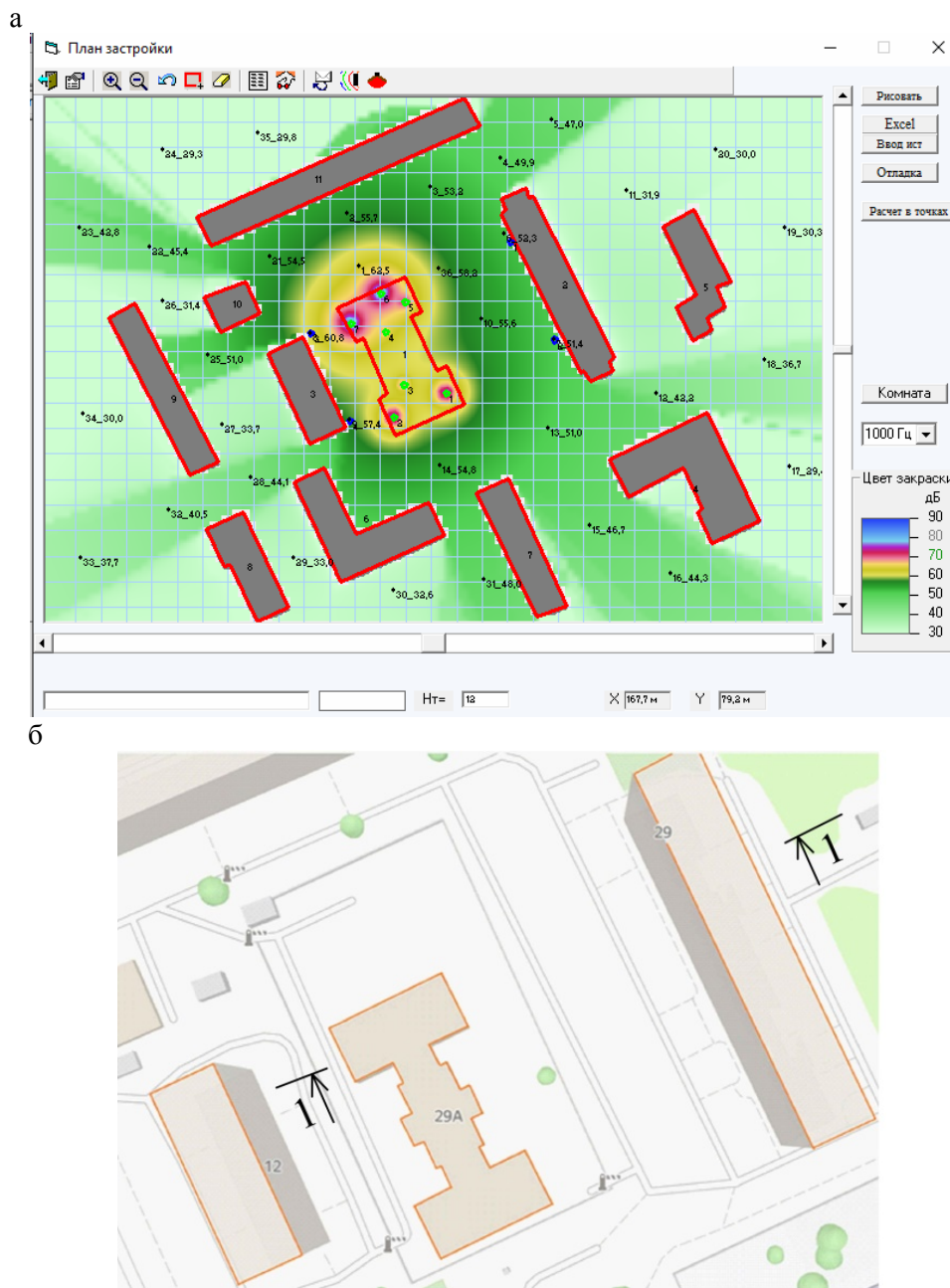


Рис. 1. Шумовая карта территории (а) и фрагмент участка застройки (б)

Источником зашумления городской территории является вентиляционная система трехэтажного административного здания Центральной базовой таможни (ЦБТ, г. Москва, ул. Клары Цеткин, д. 29А), на крыше которого размещены центробежные вентиляторы вытяжных систем вентиляции. Взаимное расположение здания ЦБТ и ближайших жилых домов № 12 и 29 показано на плане фрагмента застройки (рис. 1, б).

На рис. 1, а в качестве примера приведена общая карта зашумления территории, построенная на высоте 12 м от уровня земли в октавной полосе частот с  $f_{cp}=1000$  Гц. Как видно из карты, наблюдается значительное зашумление фасадов домов № 12 и 29.

Согласно заданию, необходимо было произвести оценку возможности снижения шума на фасаде дома №29 путем устройства на крыше здания ЦБТ шумозащитного экрана. В задании на проектирование экрана были указаны следующие требования:

высота верхней кромки экрана не должна превышать 2.2 м от поверхности кровли, между экраном и крышей должен быть зазор, необходимый для удаления снега с кровли. Вентиляторы находятся на расстоянии 3.0 м от границы крыши. Излучение звуковой энергии вентилятором происходит на высоте 0.3 м от поверхности крыши. Экран располагается по всей длине крыши без разрывов.

При выполнении расчетов приняты следующие условия. Так как зазор между экраном и опорной поверхностью может влиять на эффективность экранирования, вначале были произведены расчеты шума при работе одного вентилятора. Экран при расчете принимался бесконечной длины. Вентилятор рассматривался как точечный ненаправленный источник. Для упрощения анализа влияния зазоров на эффективность экранирования уровень акустической мощности источника во всех полосах частот при расчетах принимался равным  $L_w=100$  дБ. Схема к расчету приведена на рис. 2. Положение сечения 1-1 указано на рис. 1,б. Размеры на схеме даны в метрах.

1-1

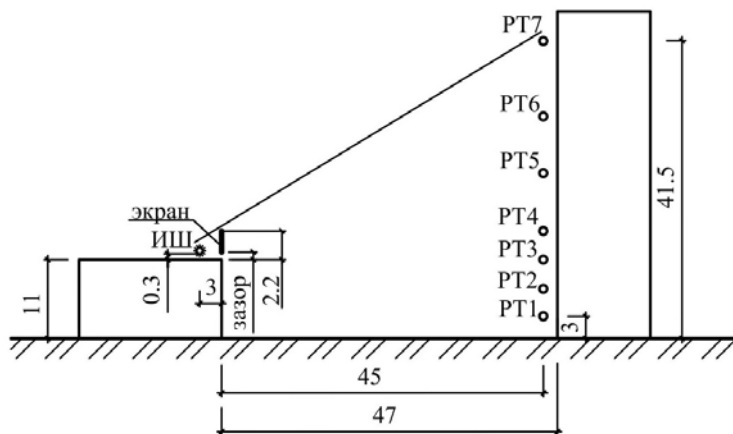
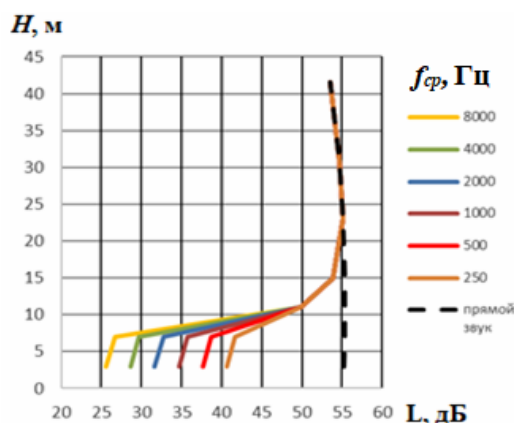


Рис. 2. Схема к расчету уровней шума на фасаде дома №29

Расчетные точки РТ1-РТ7 располагались на расстоянии 2.0 м от фасада и на высотах от уровня земли, равных 3.0, 7.0, 11.0, 15.0, 23.0, 31.0 и 41.5 м. Расчетная точка РТ7 в этом случае находится на границе акустической тени, а точка РТ3 – на уровне поверхности кровли здания ЦБТ. Ниже приведены характерные результаты расчетов для разных расчетных ситуаций.

На рис. 3,а указаны уровни звукового давления в расчетных точках при отсутствии экрана на крыше. Видно, что на фасаде в пределах от уровня земли до высоты 11 м (РТ3) наблюдается экранирование шума крышей. Дифрагированный звук в этом случае определялся методом Маекавы. На рис. 3,б приведены уровни звука при установке на крыше экрана без зазора.

а



б

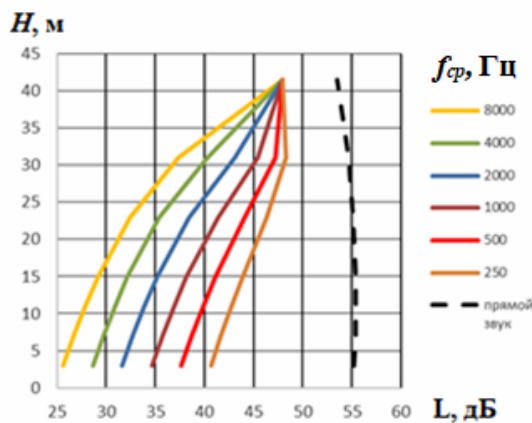


Рис. 3. Уровни звукового давления на фасаде здания при отсутствии (а) и наличии (б) экрана на крыше

Рассмотрены также ситуации при устройстве на крыше экрана с установкой его с зазорами между экраном и крышей, равными 10, 20 и 30 см.

На рис. 4,а в качестве примера приведены уровни звукового давления, рассчитанные при устройстве экрана с зазором 20 см, а на рис. 4,б показано увеличение в этом случае уровней звукового давления по высоте фасада из-за наличия зазора. Видно, что увеличение уровней зависит от частоты звука. Аналогичные результаты получены также при зазорах 10 и 30 см.

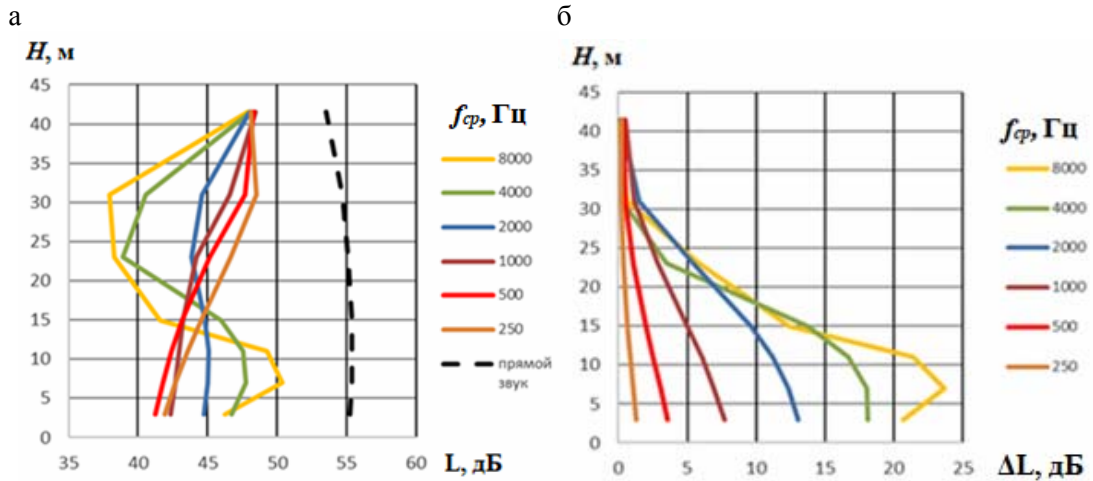


Рис. 4. Уровни звукового давления на фасаде здания (а) и их изменение из-за устройства экрана с зазором 20 см (б)

Выполненные расчеты позволили построить численные зависимости увеличения уровней звукового давления на фасаде из-за устройства между экраном и кровлей зазоров высотой 10, 20 и 30 см. На рис. 5 в качестве примера представлена частотная характеристика увеличения уровней звукового давления в расчетной точке РТЗ при устройстве зазоров 10, 20 и 30 см.

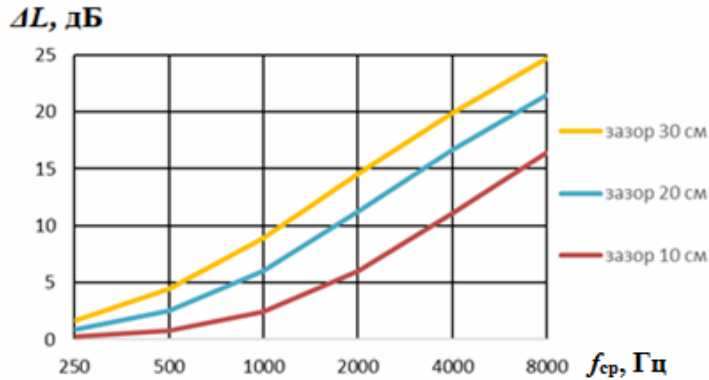


Рис. 5. Частотная характеристика увеличения уровней звукового давления в расчетной точке РТЗ ( $h=11$  м) из-за наличия зазоров между экраном и крышей

Как видно из рис. 5, снижение эффективности экранирования зависит от размера зазора и частоты звука. Оно также зависит от положения расчетной точки относительно зазора (см. рис. 4,б). По этой причине в каждом случае при проектировании экранов необходимо выполнять расчет эффективности, используя предложенную методику.

Ниже приведен пример практического использования методики для жилого дома №29. Исходя из реальных условий излучения шума всеми действующими вентиляторами здания ЦБТ, произвели расчеты шума в расчетной точке РТЗ при устройстве на крыше здания ЦБТ экранов без зазора и с зазорами 10, 20, 30 см. Данные расчетов представлены на рис. 6. Расчетные графики получены с использованием фактической частотной характеристики акустической мощности вентиляторов. На рис. 6 даны также результаты экспериментальных исследований и допустимые уровни шума на территории застройки в дневное и ночное время суток.

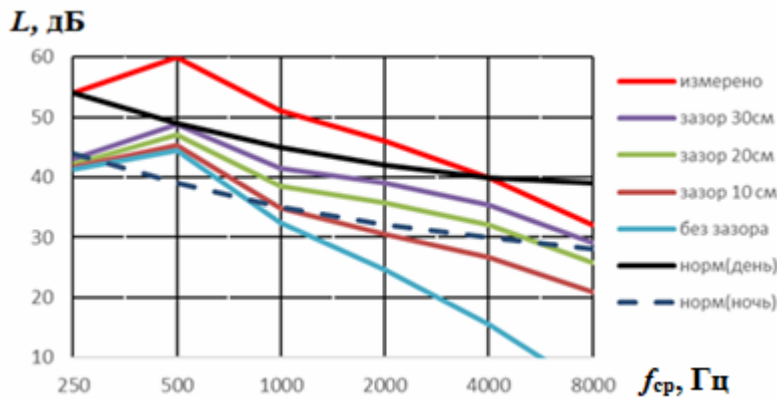


Рис. 6. Измеренные и рассчитанные при различных конструкциях шумозащитного экрана уровни звукового давления в расчетной точке РТЗ

Как видно из экспериментальных данных, уровни звукового давления в расчетной точке РТЗ превышают нормативные величины. Наибольшее превышение норм наблюдается в октавной полосе частот с  $f_{cp}=500$  Гц. В дневное время оно составляет более 10 дБ, а в ночное – более 20 дБ.

После устройства шумозащитных экранов (с зазором или без зазора) уровень шума в дневное время в расчетной точке будет соответствовать нормативным требованиям при различных конструктивных решениях экранов. В ночное время на частоте  $f_{cp}=500$  Гц шум превышает допустимые уровни на 3-5 дБ. На других частотах нормативные требования будут обеспечивать экраны без зазора или с зазором не более 10 см. По этой причине для соблюдения санитарных норм по шуму в ночное время наряду с устройством шумозащитных экранов необходимо будет запроектировать и другие шумозащитные мероприятия, например частичное отключение вентиляторов в ночное время, устройство дополнительной шумоизоляции воздуховодов [7, 8], снижение вибрации электродвигателей [9].

#### Выводы

Разработанная методика оценки влияния зазоров между экраном и опорной поверхностью на акустическую эффективность экранирования шума дает возможность проектировать шумозащитные экраны с учетом их требуемых технологических и конструктивных особенностей.

Методика проектирования шумозащитного экрана успешно апробирована для реальной городской застройки в г.Москве.

#### Список литературы

1. Иванов, Н.И. Снижение шума стационарных источников в жилой застройке технологическими шумозащитными экранами / Н.И. Иванов, В.В. Светлов, А.Е. Шашурин // Безопасность жизнедеятельности. – 2018. – № 6 (210). – С. 16–22.
2. Тюрина, Н.В. Применение акустических экранов для снижения шума в городской застройке / Н.В. Тюрина // Защита населения от повышенного шумового воздействия: сборник докладов V Всероссийской научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2015. – С. 97–112.
3. Гусев, В.П. Оптимальная защита окружающей среды от шумового воздействия оборудования систем ОВК / В.П. Гусев, В.И. Леденев, И.Л. Шубин // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2014. – № 3(7). С. 32–42.
4. Светлов, В.В. Связь эффективности шумозащитных экранов с их конструктивными особенностями / В.В. Светлов, А.Е. Шашурин // Акустика среды обитания: сборник трудов Третьей всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. – 2018. – С. 198–206.
5. Антонов, А.И. Расчеты акустической эффективности шумозащитных экранов на основе численного решения уравнения дифракции звука / А.И. Антонов, В.П. Гусев,

В.И. Леденев, И.В. Матвеева, И.Л. Шубин // Жилищное строительство. – 2024. – № 6. – С. 10–15.

6. Маекава, З. Акустические экраны / З. Маекава // Снижение шума в зданиях и жилых районах / под редакцией Г.Л. Осипова, Е.Я. Юдина. – Москва: Стройиздат, 1987. – С. 426–448.

7. Антонов, А.И. Снижение шума газовоздушных каналов энергетических предприятий звукоизолирующими облицовками / А.И. Антонов, А.В. Гречишкин, В.П. Гусев, В.И. Леденев, И.В. Матвеева // Приволжский научный журнал. – 2022. – № 1 (61). – С. 97–103.

8. Антонов, А.И. Расчет акустической эффективности звукопоглощающих облицовок, размещаемых в крупногабаритных газовоздушных каналах / А.И. Антонов, В.П. Гусев, В.И. Леденев, И.В. Матвеева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2021. – № 11 (755). – С. 83–94.

9. Гусев, В.П. Проектирование оптимальной защиты от шумового воздействия систем ОВК в административных зданиях предприятий текстильной и легкой промышленности / В.П. Гусев, В.И. Леденев // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2016. – № 4 (364). – С. 146–152.

### References

1. Ivanov, N.I. Noise reduction of stationary sources in residential buildings by technological noise shields / N.I. Ivanov, V.V. Svetlov, A.E. Shashurin // Safety of life. – 2018. – No. 6 (210). – P. 16–22.

2. Tyurina, N.V. The use of acoustic screens to reduce noise in urban buildings / N.V. Tyurina // Protection of the population from increased noise exposure: Collection of reports of the V All-Russian Scientific and Practical Conference. – Saint-Petersburg, 2015. – P. 97–112.

3. Gusev, V.P. Optimal environmental protection from the noise effects of HVAC system equipment / V.P. Gusev, V.I. Ledenev, I.L. Shubin // Biospheric compatibility: man, region, technology. – 2014. – No. 3(7). – P. 32–42.

4. Svetlov, V.V. The relationship of the effectiveness of noise shields with their design features / V.V. Svetlov, A.E. Shashurin // Acoustics of the habitat. Proceedings of the Third All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists. – 2018. – P. 198–206

5. Antonov, A.I. Calculations of acoustic efficiency of noise protection screens based on numerical solution of the sound diffraction equation / A.I. Antonov, V.P. Gusev, V.I. Ledenev, I.V. Matveeva, I.L. Shubin // Housing construction. – 2024. – No. 6. – P. 10–15.

6. Maekawa, Z. Acoustic screens / Z. Maekawa // Noise reduction in buildings and residential areas / Edited by G.L. Osipov, E.Ya. Yudin. – Moscow: Stroyizdat, 1987. – P. 426–448.

7. Antonov, A.I. Noise reduction of gas-air channels of energy enterprises with soundproof linings / A.I. Antonov, A.V. Grechishkin, V.P. Gusev, V.I. Ledenev, I.V. Matveeva // Privolzhsky Scientific Journal. – 2022. – No. 1 (61). – P. 97–103.

8. Antonov, A.I. Calculation of acoustic efficiency of sound-absorbing linings placed in large-sized gas-air ducts / A.I. Antonov, V.P. Gusev, V.I. Ledenev, I.V. Matveeva // News of higher educational institutions. Construction. – 2021. – No. 11 (755). – P. 83–94.

9. Gusev, V.P. Designing optimal protection from noise effects of HVAC systems in administrative buildings of textile and light industry enterprises / V.P. Gusev, V.I. Ledenev // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Technology of the textile industry. – 2016. – No. 4 (364). – P. 146–152.

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

Россия, 440028, г. Пенза,  
ул. Германа Титова, д.28,  
тел.: (8412) 48-27-37; факс: (8421) 48-74-77

**Дерина Мария Александровна,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Городское строительство  
и архитектура»

E-mail: gsia@pguas.ru

**Петрянина Любовь Николаевна,**

доцент кафедры «Городское строительство  
и архитектура»

E-mail: gsia@pguas.ru

**Усова Анастасия Алексеевна,**

магистрант

E-mail: gsia@pguas.ru

*Penza State University of Architecture  
and Construction*

Russia, 440028, Penza, 28, German Titov St.,  
tel.: (8412) 48-27-37; fax: (8412) 48-74-77

**Derina Maria Aleksandrovna,**

Candidate of Sciences, Associate Professor  
of the Department «Urban Construction and  
Architecture»

E-mail: gsia@pguas.ru

**Petryanina Lyubov Nikolaevna,**

Associate Professor of the Department «Urban  
Construction and Architecture»

E-mail: gsia@pguas.ru

**Usova Anastasia Alekseevna,**

Master's student

E-mail: gsia@pguas.ru

## РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОДЗЕМНЫХ ПРОСТРАНСТВ ЗДАНИЙ ПОД УКРЫТИЯ

М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина, А.А. Усова

Определяется возможность переоборудования подземных помещений зданий с различными конструктивными решениями под укрытия для защиты населения. Рассматривается устройство отсеков с тепловыми буферными зонами для принятой расчетной модели подземного пространства с использованием тепла земли. Анализируется зависимость тепловой эффективности энергоэкономичных и энергоактивных зданий от их геометрических параметров. Констатируется, что увеличение площади поверхности теплообмена ограждающих конструкций подземного сооружения при постоянстве его объема или площади способствует повышению эффективности использования тепла поверхностных слоев земли. Предлагается комплекс требований, регламентирующий объемно-планировочные и конструктивные особенности строительных конструкций, используемых в заглублённых помещениях при реконструкции. Сделан вывод о целесообразности устройства в подвальных и цокольных этажах при реконструкции зданий укрытий для защиты населения с использованием геотермальных тепловых потоков.

*Ключевые слова: подземное пространство, реконструкция здания, укрытие, тепловая эффективность, тепло земли, тепловой режим*

## RECONSTRUCTION OF UNDERGROUND SPACES OF BUILDINGS FOR SHELTERS

M.A. Derina, L.N. Petryanina, A.A. Usova

The possibility of renovation underground rooms of buildings into shelters for the protection of the population is determined. The arrangement of compartments with thermal buffer zones for the model of underground space using the heat of the earth is considered. The dependence of thermal efficiency of energy-efficient and energy-active buildings on their geometric parameters is analyzed. It is stated that an increase in the heat exchange surface area of the enclosing structures of an underground structure, while maintaining its volume or area, contributes to an increase in the efficiency of using heat from the surface layers of the earth. A set of requirements is proposed that regulates the spatial planning and design features of building structures used in recessed areas during reconstruction. The conclusion is made about the practicality of arranging shelters for population protection in basement of geothermal heat waves.

*Keywords: underground space, building reconstruction, shelter, thermal efficiency, ground heat, thermal regime*

На сегодняшний день в отечественной технической литературе практически отсутствуют чёткие технические требования к заглублённым сооружениям, предназначенным для укрытия и защиты населения от воздействия обычных средств поражения. Некоторые публикации, например [1], содержат общие требования к таким сооружениям, но не определяют конкретные задачи, которые они должны решать, а также роль и ответственность соответствующих организаций.

Ниже рассматриваются результаты исследований по адаптации существующих подземных помещений зданий для обеспечения защиты укрываемых от воздействия обычных средств поражения и обломков строительных конструкций верхних этажей в соответствии с требованиями раздела 9 и Приложения А СНИП 88.13330.2022 [2]. Также исследования были направлены на создание в данных помещениях комфортного температурного режима за счет использования геотермальных тепловых потоков.

Предлагается реконцептуализировать подземные сооружения, реализуя их потенциал как многофункциональных объектов [3]. В чрезвычайных ситуациях они могут быть использованы в качестве защитных убежищ для населения. Во время мирного времени эти сооружения могут быть адаптированы для удовлетворения экономических потребностей или обслуживания граждан. [4]. В связи с этим и согласно ГОСТ Р 42.4.16-2023 определены категории заглубленных помещений:

1. Подвалы жилых зданий, верхние этажи которых расположены ниже уровня земли.
2. Гаражи, складские и иные помещения, находящиеся в подвальных этажах отдельно стоящих сооружений, включая торговые и развлекательные центры, с уровнем пола ниже уровня земли, а также объекты метрополитена.
3. Подвалы зданий и сооружений, уровень пола которых расположен ниже уровня земли.
4. Помещения транспортных объектов городской инфраструктуры, такие, как автомобильные и железнодорожные (трамвайные) подземные тоннели, подземные переходы и т.д.
5. Простейшие укрытия, к которым относятся приспособленные погреба, подполья и др., а также естественные укрытия – пещеры, горные выработки, овраги и др.

По результатам научно-исследовательской работы был проведен анализ заглубленных помещений категорий с 1 по 4. Установлено, что защита укрываемых лиц от обычных средств поражения будет гарантирована при условии соблюдения требований к заглубленным помещениям и реализации определённых конструктивных решений в зданиях [5].

Первая группа включает в себя:

- здания, возведенные из монолитного железобетона, высотой три этажа и выше, с толщиной перекрытий не менее 250 мм (с учетом толщины напольного покрытия);
- здания из каменных материалов высотой четыре этажа и выше, оснащенные сборными железобетонными перекрытиями толщиной не менее 200 мм (с учетом толщины напольного покрытия);
- сборно-железобетонные здания и крупнопанельные постройки высотой пять этажей и выше, с толщиной перекрытий не менее 200 мм (с учетом толщины напольного покрытия). При этом вертикальные ограждающие конструкции должны быть выполнены из монолитного или сборного железобетона толщиной не менее 400 мм.

Вторая группа охватывает здания, у которых:

- вертикальные ограждающие конструкции выполнены из монолитного или сборного железобетона толщиной не менее 400 мм;
- толщина перекрытий составляет не менее 250 мм (с учетом толщины напольного покрытия).

Третья и четвертая группы заглубленных помещений требуют проведения специального обследования. Необходимо оценить защитные свойства ограждающих конструкций и разработать проектные решения по адаптации таких сооружений для обеспечения защиты населения в соответствии с требованиями СП 88.13330.2022 «Защитные сооружения гражданской обороны».



При реконструкции зданий и их подземных пространств под устройство гражданских защитных сооружений целесообразно осуществлять перепланировку в два этапа [6]. Первый этап предполагает тщательный анализ и оценку возможности адаптации существующего объемно-планировочного решения подземного помещения для его использования в качестве гражданского защитного сооружения. Второй этап включает в себя непосредственное оснащение подземного помещения необходимыми элементами и системами, обеспечивающими его функционирование как гражданского защитного сооружения, с учетом требований к геометрическим параметрам, влияющим на эффективное использование возобновляемых источников энергии – в данном случае теплообмена с грунтом [7].

Рассматриваемая проблематика является частью решения задач, поставленных в законе «Об энергосбережении и повышении энергоэффективности в строительстве и жилищно-коммунальном комплексе», и, согласно Указу Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. №145 «О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации», относится к ключевым составляющим ресурсосберегающей энергетики при формировании новых источников энергии, способов её передачи и хранения, в т.ч. использования тепла земли. В контексте с названными документами снижение удельного потребления тепловой энергии на отопление зданий должно составить 20–40 % в сравнении с нормативными значениями.

Однако для решения поставленных задач существует ряд проблем, одна из которых – большое количество мелких проектных организаций, созданных в последние годы, не имеющих достаточного опыта в разработке энергоэффективных зданий и составлении энергетических паспортов реконструируемых объектов, хотя составление такой документации является обязательной процедурой не только для вновь проектируемого здания, но и для реконструируемых и эксплуатируемых построек [8].

Одной из актуальных задач архитектурно-строительного проектирования, в соответствии со стратегией развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации до 2035 года, является повышение энергоэффективности жилых зданий при реконструкции и капитальном ремонте. Существующие программы капитального ремонта направлены на устранение физического износа, уровень которого для жилых зданий, возведенных в период с 1955 по 1970 год, варьируется от 31 до 65 %. Очевидно, что в ближайшие десять лет старение 5- и 9-этажных жилых домов, помимо системы капитального ремонта, потребует внедрения программ реконструкции, модернизации или реновации данного жилищного фонда с использованием экспериментальных методов [9].

При изучении материалов отдельных реконструируемых объектов определено, что оценку возможности использования заглубленных помещений для укрытия населения следует проводить совместно с органами исполнительной власти субъекта Российской Федерации с участием территориальных органов МЧС России на основании данных технических паспортов зданий или материалов обследования, а также технических осмотров заглубленных помещений, в том числе с привлечением заинтересованных организаций [10].

С учетом вышеизложенного выполнен анализ объемно-планировочных решений существующих жилых зданий и их подземных пространств, предполагаемых к реконструкции. В ходе анализа было определено, что у данных зданий отношение наружных теплоотдающих поверхностей  $S_{огр}$  к объему, выражаемое коэффициентом компактности  $K = S_{огр}/V$ , значительно выше, чем у новостроек, т.е. их удельная тепловая потребность больше, а у владельцев жилья возможности осуществления платежей за коммунальные ресурсы на нужды всего дома ограничены тарифами и нормативами. Кроме того, применение энергосервисных контрактов и кредитных инструментов сталкивается с административными препятствиями.

Иностранные и отечественные ученые, изучающие данную проблему, пришли к выводу, что использование возобновляемых источников энергии для существующих зданий, в т.ч. подземных объемов, при реконструкции является весьма выгодным. Эффективность их применения можно оценить по доле тепла  $f$ , получаемого из этих

источников, в общей тепловой нагрузке здания, которая растет значительно быстрее с увеличением отапливаемого объема здания, чем доля тепла от природных источников, таких, как солнечная радиация ( $F_c$ ) или тепло верхних слоев земли ( $F_3$ ).

Результаты расчетов выявили значительную разницу в доле тепла  $f$ , получаемого от солнечной радиации на энергоактивную конструкцию стены, в общей тепловой нагрузке двухэтажного многоквартирного и двухэтажного 16-квартирного жилых домов с отапливаемой площадью соответственно 122 и 1200 м<sup>2</sup>. В частности, для первого здания с тепловой нагрузкой 67,6 кДж значение  $f$  за отопительный период достигает 15 %, тогда как для второго здания с тепловой нагрузкой 1057 кДж этот показатель составляет лишь 3,5 %. Предполагается, что для многоэтажных жилых зданий, обладающих значительно большей тепловой нагрузкой, значение  $f$  будет практически незначительным.

Анализ зависимости тепловой эффективности энергоэкономичных и энергоактивных зданий от их геометрических параметров (рис. 1) показал интересные закономерности. Во-первых, для энергоэкономичных зданий наблюдается положительная корреляция между размерами здания и его тепловой эффективностью: чем больше размеры, тем выше эффективность. Это связано с тем, что большие площади могут лучше использовать солнечное тепло и сохранять его в течение дня, что приводит к уменьшению затрат на отопление. Во-вторых, важным фактором, влияющим на энергоэффективность, является ширина корпуса здания. Для энергоэкономичных зданий увеличение ширины приводит к улучшению тепловой эффективности, которая объясняется тем, что более широкие здания могут иметь больший объем, позволяющий лучше распределять тепло и эффективно использовать его. Однако для зданий, использующих возобновляемые источники энергии (солнечные коллекторы), ситуация иная. Здания, где используется солнечная энергия ( $F_c$ ,  $F_3$ ), показывают, что узкокорпусные конструкции более эффективно используют солнечное тепло. Энергоактивные конструкции, работающие по принципу плоского солнечного коллектора, демонстрируют больший эффект подогрева воздуха в помещениях, расположенных в узких зданиях, что объясняется большим проникновением солнечного света и лучшим прогревом. Определено, что в жилых зданиях с высотой этажа 3 метра и шириной менее 12 метров [11] обеспечиваются наилучшие условия для использования солнечной энергии. Таким образом, оптимизация геометрических параметров реконструируемых зданий имеет критическое значение для повышения их тепловой эффективности. Проектируя энергоэффективные здания и их подземные пространства при реконструкции, следует учитывать не только общие размеры, но и соотношение ширины и высоты, что позволит максимально использовать преимущества возобновляемых источников энергии.

Максимальное количество солнечной радиации на наружной поверхности ограждающей конструкции в конкретный момент времени поступает исключительно с одной стороны горизонта. Поэтому солнечные дома, классифицируемые как энергоэффективные здания, имеют светопропускающие ограждения на освещенных сторонах (как правило, южных).

Натурные исследования показали, что инсолируемые ограждающие конструкции зданий в зимний период функционируют как элементы, одновременно поглощающие и отдающие тепло. Наружные ограждения подземной части здания при условии эффективной теплоизоляции цокольного перекрытия выступают в роли конструкций, поглощающих тепло. В отличие от инсолируемых поверхностей, подземные ограждения получают тепловое воздействие со всех сторон окружающего грунта. Этот фактор приводит к тому, что уменьшение коэффициента компактности подземной части здания оказывает негативное влияние на тепловую эффективность по сравнению с надземной частью традиционных зданий.

В ходе исследования взаимосвязи геометрических параметров подземного пространства зданий и теплопритоков от грунта было принято допущение о равенстве термических сопротивлений всех наружных ограждающих конструкций подземной части здания. При этом теплопритоки через цокольное перекрытие не учитывались, а теплопотоки от грунта были проанализированы в соответствии с данными, представленными на рис. 2.

План подземного пространства с числом $n=2$ подвальных секций	Здания с использованием тепла земли	Здания с использованием тепла солнечной радиации	Здания с обычной системой отопления
Факторы, влияющие на функцию $F(x, y, z)$ - геометрические параметры здания: ширина, длина, высота)			
	$F_3 = f(K)$	$F_c = f(K)$	$F_m = f(1/K)$
$F_3 = f(n)$	$F_3 = f(1/x, y, z)$	$F_c = f(1/x)$	$F_m = f(x, y, z)$

Рис. 1. Анализ зависимости тепловой эффективности энергоэкономичных и энергоактивных зданий от их геометрических параметров

Схемы подземного пространства			
X			10 14 18 22
Y		30 50 70 90	
Z	2 2,5 3 3,5		
$K = S_{\text{от}}/V$	0,74 0,64 0,57 0,53	0,67 0,64 0,63 0,62	0,64 0,58 0,55 0,53
$K = S_{\text{от}}/S_n$	1,48 1,6 1,72 1,84	1,67 1,6 1,57 1,56	1,6 1,46 1,38 1,33

Рис. 2. Взаимосвязь геометрических параметров подземного пространства здания и теплопотоков от грунта

Данные, приведенные на рис. 2, свидетельствуют о том, что эффективность использования тепла верхних слоев земли, измеряемая отношением площади обогрева  $S_{\text{отп}}$  к объёму подземного пространства  $V$ , снижается по мере увеличения размеров этого пространства. При этом наиболее существенное влияние оказывает рост вертикального размера  $z$ . Так, увеличение высоты пространства от 2 до 3,5 метра может привести к уменьшению эффективности использования тепла в 1,4 раза. Если рассматривать отношение  $S_{\text{отп}}/S_n$  (где  $S_n$  – площадь подземного пространства), то можно видеть, что при увеличении ширины и длины пространства наблюдается его снижение. В то же время рост параметра  $z$  приводит к заметному увеличению данного отношения.

Расширение площади поверхности теплообмена ограждающих конструкций подземного сооружения при неизменных значениях его объема или площади может способствовать увеличению эффективности использования тепла верхних слоев земли.

Данный принцип был реализован в проекте индивидуального жилого дома с отапливаемой площадью 120 кв. м, оснащенного системой вентилируемых тонкостенных каналов, расположенных в грунте под полом здания и соединенных с системой воздушного отопления [12]. Повышение площади контакта поверхности каналов с землей за счет увеличения их количества с одного до восьми в рамках принятой расчетной модели позволило вдвое повысить температуру воздуха на выходе из каналов и увеличить долю тепла, получаемого от верхнего слоя земли, от 26 до 40 % от общей тепловой нагрузки системы воздушного отопления данного здания.

Расширение подземной площади здания может быть реализовано посредством создания изолированных секций, разделенных тепловыми буферными зонами. Эти зоны представляют собой двойные перегородки с прослойкой теплоаккумулирующего материала между ними. Объем теплоподдачи в подземное пространство напрямую зависит от количества таких секций ( $n$ ). При использовании этих секций жильцами в качестве кладовых, овощехранилищ и т.д. возникает необходимость в тщательном расчёте толщины ( $L$ ) слоя теплоаккумулирующего материала между перегородками. Это необходимо для обеспечения длительного и стабильного теплового обмена между секциями и подземным пространством здания.

При проектировании подземного пространства здания были определены следующие геометрические параметры: длина – 82 метра, ширина – 10 метров и высота – 2,5 метра (рис. 3). Предполагаемая толщина изолирующего слоя  $L$ , равная 2 метрам, была выбрана с расчетом на обеспечение равномерного теплообмена между каждым отсеком буферной зоны и окружающим грунтовым массивом.

Как показано на рис. 3, устройство отсеков с тепловыми буферными зонами для принятой расчетной модели подземного пространства позволяет заметно повысить эффективность использования тепла верхних слоев земли, например в 1,24 раза при числе отсеков  $n = 6$ . На практике такие отсеки (помещения) целесообразно устраивать в подвальных и цокольных этажах при реконструкции зданий с целью их использования под укрытия для защиты населения.

**В ы в о д ы :**

1. Проведен анализ комплекса вопросов, связанных с потенциалом переоборудования подземных помещений зданий с различными конструктивными решениями в укрытия для защиты населения от воздействия обычных средств поражения и нагрузок при обрушении верхних этажей с учетом требований, предъявляемых к заглубленным помещениям в контексте их использования в качестве укрытий.

2. Предложена систематизация всех типов подземных сооружений, пригодных для укрытия населения, в соответствии с уровнем защиты от традиционных средств поражения и установленными нормами для подобных объектов.

3. Установлено, что увеличение площади поверхности теплообмена ограждающих конструкций подземного сооружения при постоянстве его объема или площади способствует повышению эффективности использования тепла поверхностных слоев земли.

4. Разработан комплекс требований, регламентирующий объемно-планировочные и конструктивные особенности строительных конструкций, используемых в заглублённых помещениях при реконструкции.

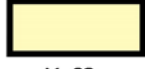
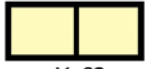


Схемы разделения подземного объема здания	$F_b = S/V$
 <p><math>Y=82</math> без разделения</p>	0,62
 <p><math>Y=82</math> двухчастное разделение</p>	0,65
 <p><math>Y=82</math> трёхчастное разделение</p>	0,68
 <p><math>Y=82</math> шестичастное разделение</p>	0,77

Рис. 3. Варианты геометрических параметров подземного пространства здания

1. Ничкова, Л.А. Анализ мероприятий по подготовке к использованию заглубленных помещений для укрытия населения в рамках гражданской обороны и защиты от чрезвычайных ситуаций / Л.А. Ничкова, С.М. Рыкунов // Экономика строительства и природопользования. – 2022. – № 4 (85).
2. СП 88.13330.2022. Защитные сооружения гражданской обороны. – Москва, 2022.
3. Панов, И.В. Приспособления существующих подвалов в зданиях и сооружениях для укрытия людей в особый период / И.В. Панов // Актуальные вопросы безопасности жизнедеятельности в современных условиях: сборник. – Москва: Объединенная редакция, 2019. – С. 119–124.
4. Тонких, Г.П. Руководство по проектированию новых и приспособлению существующих зданий и сооружений под укрытия / Г.П. Тонких, Н.Н. Посохов, Р.А. Бузин, А.С. Халимова. – М.: Минстрой России; ФАУ ФЦС, 2017.
5. Дерина, М.А. Сравнительный анализ технико-экономических показателей проектных решений жилых и общественных зданий / М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина, М.А. Чупряков // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №1. – С.75–79.
6. Петрянина, Л.Н. Концепция технико-экономической оценки реконструкции городской застройки / Л.Н. Петрянина, М.А. Дерина, Ю.С. Сергунина // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – №1(42). – С.212–217.
7. Селиванов, Н.П. Энергоактивные здания / Н.П. Селиванов, А.И. Мелуа, С.В. Зоколей [и др.]. – Москва: Стройиздат, 1988. – 376 с.
8. Петрянина, Л.Н. Реконструкция городской среды: новая и сложившаяся застройка / Л.Н. Петрянина, М.А. Дерина, П.В. Монастырев // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – №4. – С. 83–86.
9. Дерина, М.А. Архитектурно-строительное проектирование: проблемы оценки качества / М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина, О.Л. Викторова // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – №2. – С.75–79.
10. Методические рекомендации по проведению комплексной инвентаризации заглубленных и других помещений подземного пространства для укрытия населения: утверждено МЧС России 07.08.2014 г., № 2-4-87-18-35.
11. Береговой, А.М. Энергосбережение в архитектурно-строительном проектировании / А.М. Береговой, А.П. Прошин, В.А. Береговой // Жилищное строительство. – 2002. – № 5. – С. 4–6.
12. Береговой, А.М. Энергосбережение в индивидуальном жилом доме при использовании тепла верхних слоев земли / А.М. Береговой, В.А. Береговой // Известия вузов. Строительство. – 2008. – № 10. – С. 54–58.
13. ГОСТ Р 42.4.03-2015. Защитные сооружения гражданской обороны. – Москва, 2015.
14. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. – Москва, 2018.
15. Российская Федерация. Законы. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федеральный закон № 123-ФЗ от 22.07.2008.
16. СП 165.1325800.2014. Инженерно-технические мероприятия по гражданской обороне. – Москва, 2014.
17. СП 15.13330.2020. Каменные и армокаменные конструкции. – Москва, 2020.

## References

1. Nichkova, L.A. Analysis of measures to prepare for the use of sunken rooms to shelter the population in the framework of civil defense and protection from emergencies / L.A. Nichkova, S.M. Rykunov // Economics of construction and environmental management. – 2022. – № 4 (85).
2. SP 88.13330.2022. Civil defense defenses. – Moscow, 2022.
3. Panov, I.V. Adaptation of existing basements in buildings and structures to shelter people in a special period / I.V. Panov // Current issues of life safety in modern conditions: collection. – Moscow: United Edition, 2019. – P. 119–124.

4. Tonkikh, G.P. Guidelines for the design of new and adaptation of existing buildings and structures for shelters / G.P. Tonkikh, N.N. Posokhov, R.A. Buzin, A.S. Khalimova. – Moscow: Ministry of Construction of Russia; FAA FTS, 2017.
5. Derina, M.A. Comparative analysis of technical and economic indicators of design solutions for residential and public buildings / M.A. Derina, L.N. Petryanina, M.A. Chupryakov // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 1. – P.75–79.
6. Petryanina, L.N. The concept of technical-economic assessment of urban development reconstruction / L.N. Petryanina, M.A. Derina, Yu.S. Sergunina // Regional architecture and engineering. – 2020. – №1(42). – P. 212–217.
7. Selivanov, N.P. Energoactive buildings / N.P. Selivanov, A.I. Melua, S.V. Zokoley [et al.]. – Moscow: Stroyizdat, 1988. – 376 p.
8. Petryanina, L.N. Reconstruction of the urban environment: new and established buildings / L.N. Petryanina, M.A. Derina, P.V. Monastyrev // Regional architecture and engineering. – 2016. – №4. – P. 83–86.
9. Derina, M.A. Architectural and construction design: problems of quality assessment / M.A. Derina, L.N. Petryanina, O.L. Viktorova // Regional architecture and engineering. – 2022. – No. 2. – P.75–79.
10. Methodological recommendations for conducting a comprehensive inventory of buried and other underground spaces for sheltering the population: approved by the Ministry of Emergency Situations of Russia on 08/07/2014, No. 2-4-87-18-35.
11. Beregovoy, A.M. Energy saving in architectural and construction design / A.M. Beregovoy, A.P. Proshin, V.A. Beregovoy // Housing construction. – 2002. – No. 5. – P. 4–6.
12. Beregovoy, A.M. Energy saving in an individual residential building using the heat of the upper layers of the earth / A.M. Beregovoy, V.A. Beregovoy // Izvestiya vuzov. Construction. – 2008. – No. 10. – P. 54–58.
13. GOST R 42.4.03-2015. Civil defense defenses. – Moscow, 2015.
14. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. – Moscow, 2018.
15. The Russian Federation. Laws. Technical regulations on fire safety requirements: Federal Law No. 123-FZ dated 07/22/2008.
16. SP 165.1325800.2014. Engineering and technical measures for civil defense. – Moscow, 2014.
17. SP 15.13330.2020. Stone and reinforced stone structures. – Moscow, 2020.